



Apport de l'étude conjointe de systèmes dynamiques libres et commandés dans la compréhension des concepts d'équilibre et de stabilité

Michaël Canu

► To cite this version:

Michaël Canu. Apport de l'étude conjointe de systèmes dynamiques libres et commandés dans la compréhension des concepts d'équilibre et de stabilité. Education. Université Paris Diderot Paris 7; Universidad Los Andes, Bogota, 2014. Français. NNT: . tel-01108459

HAL Id: tel-01108459

<https://theses.hal.science/tel-01108459>

Submitted on 22 Jan 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse présentée pour obtenir le grade de docteur des
universités

Paris Diderot (France) et Los Andes (Colombie)

Laboratoire de Didactique André Revuz

École doctorale « Savoirs Scientifiques : épistémologie, histoire des sciences
et didactique des disciplines »

Discipline : Didactique des sciences

Apports de l'étude conjointe de systèmes dynamiques libres et commandés pour la compréhension des concepts d'équilibre et de stabilité

PAR : **Michaël Canu**

MEMBRES DU JURY:

Rapporteur : Jean-Marie Boilevin, Professeur, Université de Bretagne Occidentale

Rapporteuse : Marisa Michellini, Professeure, Université d'Udine (Italie)

Examineur : Henri Bourlès, Professeur, CNAM Paris/ENS Cachan

Examineur : François Gallet, Professeur, Université Paris Diderot

Examinatrice : Carola Hernandez, Professeure associée, Université de Los Andes

Co-directrice : Cécile de Hosson, Professeure, Université Paris Diderot

Co-directeur : Mauricio Duque, Professeur associé, Université de Los Andes

Date de soutenance : 11 décembre 2014

Tesis para obtener el grado académico de doctor de
las universidades
Paris Diderot (Francia) y Los Andes (Colombia)

Disciplina : Ingeniería

Aportes del estudio conjunto de sistemas dinámicos libres y realimentados en la comprensión de los conceptos de equilibrio y de estabilidad

AUTOR : Michaël Canu

JURADO:

Relator : Jean-Marie Boilevin, Profesor titular, Université de Bretagne Occidentale

Relatora : Marisa Michellini, Profesora titular, Universidad de Udine (Italia)

Examinador : Henri Bourlès, Profesor, CNAM Paris/ENS Cachan

Examinador : François Gallet, Profesor titular, Universidad Paris Diderot

Examinadora : Carola Hernandez, Profesora asociada, Universidad de Los Andes

Co-directora : Cécile de Hosson, Profesora titular, Universidad Paris Diderot

Co-director : Mauricio Duque, Profesor asociado, Universidad de Los Andes

Fecha de sustentación : 11 de diciembre de 2014

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu mes directeurs de thèse, Cécile de Hosson et Mauricio Duque, sans qui ce travail n'aurait pu être mené à son terme et qui sont à l'origine même de cette « aventure ». Cécile s'est toujours montrée disponible et ses conseils ont toujours été bienveillants, extrêmement précis et précieux. J'ai beaucoup appris à son contact. Je n'ai pu malheureusement passer que quelques mois auprès de Mauricio en Colombie mais j'en garde le souvenir d'une expérience très enrichissante sur bien des plans.

Je remercie également Madame Marisa Michellini et Monsieur Jean-Marie Boilevin pour avoir accepté de juger ce travail et d'en être les rapporteurs.

J'ai eu le privilège de suivre les enseignements du professeur Henri Bourlès voici quelques années et j'en garde un excellent souvenir. Je suis très honoré qu'il ait accepté de faire partie du jury, qu'il en soit remercié.

Je remercie également Monsieur François Gallet et Madame Carola Hernandez, d'avoir accepté d'examiner mon travail.

Merci à Laurence Viennot avec qui j'ai pu avoir des échanges très riches qui, grâce à sa grande expérience et ses critiques sans concessions, m'ont sans aucun doute fait progresser.

Merci à Nicolas Décamps qui m'a aidé à mettre au point mon questionnaire informatique et à Maria Figueroa qui m'a donné de précieux conseils sur les méthodes quantitatives de traitement des données.

Merci à toutes celles et ceux qui ont contribué de près ou de loin au succès de cette entreprise longue et exigeante : les élèves de l'École des Mines de Nantes et de l'université de Los Andes qui ont acceptés de répondre à mes questions, les enseignants qui ont acceptés de me « prêter » leurs élèves ou de participer à des entretiens...

Je tiens à remercier aussi chaleureusement toute l'équipe du LDAR, les doctorants avec qui j'ai pu partager de nombreux moments d'échanges scientifiques et personnels dans la bonne humeur : Robin, Valentin et Luz bien sûr, et les chercheurs du laboratoire dont j'ai suivi les enseignements et qui se sont toujours montrés disponibles et bienveillants, en toutes occasions.

Enfin, merci à Paula, qui m'a supporté, accompagné, dorloté tout au long des 3 ans de ce travail et finalement... épousé !

Sommaire

1	Introduction générale	1
I	Les étudiants face aux concepts d'équilibre et de stabilité	23
	Introduction	25
2	Les difficultés des élèves ingénieurs à propos des concepts d'équilibre et de stabilité	27
3	Les connaissances des étudiants ingénieurs à propos de l'équilibre et de la stabilité	49
4	Exploration des origines possibles des difficultés des étudiants à propos du concept d'équilibre	67
	Conclusion	81
II	Étude d'une ingénierie didactique adaptée	83
5	Introduction : l'approche « évolutionniste »	85
6	Le cadre de l'ingénierie didactique	91
7	Étude d'une ingénierie didactique « équilibre et stabilité »	103
	Conclusion	161
III	Conclusions et perspectives	163
8	Conclusions	165

9 En quoi le manque de compréhension des concepts d'équilibre et de stabilité est-il problématique chez les élèves ingénieurs ?	169
10 Perspectives	175
Références	177
 Annexes	 187
Liste des annexes	191
Lexicographie	191
Les questionnaires	207
Équations du système pendule/chariot	225
Un outil d'évaluation informatique du raisonnement « évolutionniste »	229

Resumen

La Automática, parte técnica de la Cibernética (Wiener, 1948), es una disciplina joven (Mayr, 1970) que hace parte de las Ciencias de Ingeniería. Ella es enseñada en numerosas formaciones superiores técnicas y varios pensum de Escuelas de Ingenieros, pero algunas de sus nociones esenciales aparecen también en la enseñanza secundaria, por ejemplo a través de la introducción al estudio de sistemas químicos o de regulación en Ciencias Naturales.

Los conceptos de « equilibrio » y de « estabilidad » que se asocian a la Automática, son aprendidos por los estudiantes de Ciencias de formas muy diferentes, que dependen de su pasado académico y del punto desde el cual sea abordado el estudio: mecánica, matemática, algorítmica. En todos los casos, sin embargo, se observa que los estudiantes tienen dificultades para comprender el funcionamiento de dichos sistemas; a pesar de que conocen las formulas asociadas, no siempre consiguen resolver los problemas propuestos si estos salen de los « casos de libro », como aquel del péndulo.

El presente trabajo se sitúa en la interfaz de dos campos de investigación: el de la Didáctica de la Física y el de la Didáctica de Ciencias de la Ingeniería. En la primera parte de este trabajo se exploran las concepciones de los estudiantes en ingeniería a propósito de las nociones de equilibrio et de estabilidad, en el contexto de la mecánica clásica y de los vínculos existentes con el concepto de cinemática de la inmovilidad. Para eso, diseñamos un cuestionario basado sobre un sistema original de un sistema conocido de los alumnos pero que puede moverse en un carro. Este trabajo permitió descubrir que, de un lado, los conceptos de equilibrio y de estabilidad son mezclados en el sistema de pensamiento de los alumnos y de otro lado que el equilibrio estable no tiene el mismo estatuto que el equilibrio inestable (Canu et al., 2014). Además, estas situaciones permitieron añadir nuevos elementos a la nomenclatura de las facets of thinking de Minstrell (1992).

Para verificar los conocimientos previos de los alumnos sobre el equilibrio en el dominio de la mecánica clásica e intentar entender por este medio las dificultades de ellos, diseñamos un cuestionario enfocado en el marco teórico del aprendizaje por (resolución de) problemas (APB o PBL, problem-based learning). Con este herramienta, pudimos evaluar los conocimientos declarativos, procedurales y esquemáticos de los alumnos sobre estos conceptos. Parece que los estudiantes poseen estos conocimientos declarativos y procedurales (Shavelson, 2005) de manera muy superficial y cuando los conocen, utilizan otros modos de razonamiento, más cuantitativo, para resolver los problemas que no dan buenos resultados en los casos que se encuentran alejados de los casos clásicos. Entonces podemos decir que los estudiantes no poseen conocimiento operacional sobre estos conceptos. Sin embargo, siguieron cursos de varias áreas (incluso mecánica clásica) en los cuales estaban

presentes estos conceptos. Se condujeron investigaciones sobre las experiencias (académicas, empíricas y lingüísticas) pasadas de los estudiantes en las cuales estuvieron en contacto con el equilibrio y la estabilidad. Se encontró que se puede poner en relación el sentido común de estas palabras y estas experiencias con tres grandes concepciones erróneas: equilibrio-inmóvil, equilibrio-estable y equilibrio-inestable que no corresponden totalmente al saber establecido. Se puede decir que las experiencias académicas no contribuyen a un mejor entendimiento de estos conceptos, principalmente por causa de una separación disciplinaria. En unos casos, se puede afirmar que la escuela incluso favorece ciertas concepciones erróneas con el estudio de casos muy particulares (la balanza o el equilibrio del cuerpo, por ejemplo) que no se pueden generalizar sin tener algunas precauciones. Escogimos hacer un intento para remediar esta falta de comprensión de los alumnos en un curso de control de nivel universitario. Utilizando el marco metodológico de la Ingeniería Didáctica de Artigue (1988) y un marco socio-constructivista (Doise, 1981) de cambio conceptual (Posner et al., 1992 ; Duit et al., 2003 ; Vergnaud 1990), se diseñó una secuencia de aula basada en el estudio de varios sistemas/situaciones para promover un conflicto cognitivo (Piaget, 1931 ; Bush, 2004) en los estudiantes. En esta secuencia, los estudiantes tuvieron que re-formular las definiciones del equilibrio y de la estabilidad, utilizando un enfoque “evolucionista” que permite entender la naturaleza “estacionaria” de estos conceptos. Este enfoque se obtiene directamente de la definición matemática de estos conceptos pero no involucran el uso de criterios disciplinarios. Esta ingeniería mostró un mejoramiento ligero de la comprensión de estos conceptos en el caso mecánico después de dos talleres de 1h20. Estos resultados fueron medidos con una herramienta informática concebida específicamente para evaluar este tipo de razonamiento “evolucionista” en un diseño casi-experimental pre-testo post-testo, con comparación por medio de dos grupos de control.

Sin embargo, el diseño experimental utilizado no permite decir con certeza que el efecto observado viene solo de la ingeniería didáctica sino de un efecto global incluyendo la prueba. Pero ello muestra que se puede comenzar un cambio conceptual en los alumnos con una intervención didáctica reducida al interior de un curso clásico.

Sin embargo, se puede pensar que una intervención parecida pero más temprana al nivel universitario, sería más eficaz porque son conceptos inculcados en profundidad en los estudiantes (Treagust, 2009). Por ejemplo, en educación primaria o secundaria, tal intervención permitiría el desarrollo de modelos precursores (Ravanis et al., 2007) de manera que los alumnos entiendan los conceptos de equilibrio y estabilidad de manera más homogénea en todas las disciplinas. Igualmente, un cambio de prácticas en los docentes, basado en el uso de situaciones de equilibrio apropiadas y de una terminología apro-

piada sobre estos temas desde los niveles académicos bajos, podría evitar que los alumnos mezclen estos conceptos.

À Nelson

Rien n'est plus proche du vrai que le faux.

A. Einstein

Introduction générale

1.1 Contexte et problématique

L'ingénierie qui, selon la définition proposée par le dictionnaire Larousse, est :

[L']Étude d'un projet industriel sous tous ses aspects (techniques, économiques, financiers, monétaires et sociaux) et qui nécessite un travail de synthèse coordonnant les travaux de plusieurs équipes de spécialistes.

attire chaque année un nombre sans cesse croissant d'étudiants¹, représentant à l'heure actuelle près de 40%² de tous les étudiants des filières scientifiques dans l'enseignement supérieur en France. La recherche en didactique s'est encore très peu intéressée à ce domaine qui peut apparaître comme une sorte d'« amalgame » d'autres disciplines semblant bien mieux délimitées (comme l'économie, les mathématiques, etc.) et dont les processus d'enseignement et d'apprentissage sont examinés dans chacune, individuellement. Il est cependant un aspect de l'ingénierie que l'on peut qualifier à la fois de transversal et d'autonome, qui s'intéresse à l'analyse et à la commande des *systèmes* : l'automatique. Cette discipline encore jeune, si on la compare à la mécanique par exemple, s'est construite, comme on va le voir plus loin, à partir des développements des mathématiques menés dans plusieurs autres domaines (physique et chimie essentiellement). Elle est la partie technologique de ce que l'on appelle la *cybernétique*, qui comme l'a précisé son fondateur, Wiener (1948), est la « théorie entière de la commande et de la communication, aussi bien chez l'animal que dans la machine ». À l'heure actuelle, elle jouit d'une vaste étendue d'application, allant de l'électronique à l'économie, en passant par la médecine. De ce fait, elle est enseignée dans tous les cursus ingénieurs en France et à l'étranger. Cette discipline, axée sur une approche *systémique*, étudie entre autres, l'*équilibre* et la

1. Avec une progression de l'ordre de 3% par ans, à comparer aux 0,8% de croissance des effectifs des filières scientifiques universitaires.

2. Hors filières de santé. Source : MESR-DGESIP-DGRI SIES, 2013.

stabilité des systèmes dans le but de les *commander* (les *asservir*³ ou les *réguler*⁴).

Ces deux concepts ne sont pas circonscrits à cette discipline, la mécanique ou la chimie, par exemple, les utilisent aussi et, par conséquent, les étudiants qui suivent les cours d'automatique ont déjà été confrontés à ceux-ci de manière académique.

Mais, pas seulement. En effet, on peut avancer, même en étant prudent, que seuls les enfants d'âge préscolaire⁵ n'ont pas déjà été en contact⁶ avec les concepts d'équilibre et de stabilité. Et c'est même principalement dans des contextes non académiques que ce contact a lieu, ce qui bien entendu, implique sans conteste des premières constructions de sens éloignées du formalisme scientifique.

Dans le cadre d'un travail de master, nous avons pu nous rendre compte que les élèves⁷ des cours d'automatique d'une école d'ingénieur⁸ avaient quelques difficultés pour traiter des problèmes⁹ d'équilibre et de stabilité basés sur des systèmes non scolaires comme des girouettes, fusées, etc. Mais ces difficultés n'étaient pas isolées. Une autre étude de master, conduite auprès d'étudiants d'une faculté d'ingénierie en Colombie, a révélé leur caractère presque « universel »¹⁰.

Ces premières constatations, nous ont amené à envisager un travail autour de la question suivante : Quel est le lien entre la construction de ces deux concepts chez les étudiants et les difficultés de compréhension que l'on peut encore observer à la fin des cours d'automatique ? Si l'on devait résumer toutes les questions que l'on va aborder, nous pourrions dire que ce travail va tenter de faire le point sur la connaissance des étudiants des cursus ingénieurs à propos des concepts d'équilibre et de stabilité, leur construction et sur les moyens de parvenir à les transmettre d'une manière plus « opérationnelle ».

3. Faire en sorte que la sortie d'un système suive des valeurs prédéfinies.

4. Faire en sorte que la sortie d'un système reste constante, fixée sur une valeur, en dépit des perturbations.

5. Avant l'entrée dans l'enseignement obligatoire, entre 3 et 6 ans.

6. Ne serait-ce qu'un contact « linguistique » et pas forcément empirique.

7. Il est coutume de dénommer les étudiants des écoles d'ingénieurs françaises par le vocable « élèves », comme pour les élèves des cursus primaires ou secondaires. Ce travail s'intéressant majoritairement à ce public mais aussi à celui des facultés d'ingénierie, nous pourrions les désigner par les termes « étudiants », « élèves ingénieurs » ou simplement « élèves » sans que cela ne dénote une quelconque différence quant à leur niveau ou à la structure les recevant.

8. Une école des Mines.

9. Il s'agissait essentiellement de dire si les systèmes considérés étaient en équilibre et de caractériser cet équilibre.

10. Le fait de relever un même problème dans deux endroits du monde, ne rend pas ce problème universel, bien entendu. Cependant, les systèmes éducatifs dans ces deux pays étant relativement éloignés, cela laisse supposer des causes non réduites à l'enseignement reçu, et, possiblement transculturelles.

Avant de présenter le plan de notre étude et d'entamer le premier chapitre, nous allons faire un point sur ces concepts, du point de vue des contenus, en examinant en particulier, l'histoire des sciences.

1.2 Analyse de contenu : qu'est-ce que l'équilibre ?

L'équilibre et la stabilité sont des concepts figurant dans plusieurs disciplines, et largement présents dans les curricula français et étrangers tant au niveau élémentaire, secondaire que supérieur (étude des balances et leviers à l'école primaire française et Belge et dans les « middle schools » américaines, du pendule pesant au collège et dans les « high schools », étude du pendule pesant dans le supérieur en France et à l'étranger, équilibres chimiques au lycée, etc.).

Ces concepts sont fondamentaux en automatique que l'on enseigne généralement à partir du premier cycle d'études supérieures, dans certaines filières des classes préparatoires aux grandes écoles, des IUT, des écoles d'ingénieurs et des universités.

Il sera beaucoup question de physique dans ce travail, et principalement de mécanique classique. Premièrement, parce que c'est un des premiers domaines scientifiques dans lequel les étudiants rencontrent la notion d'équilibre. Ensuite, parce que ce domaine fournit assez simplement des exemples-problèmes comme ceux auxquels vont être soumis les étudiants de cette étude.

En physique, l'équilibre est défini comme l'« état d'un système matériel dans lequel certains paramètres ou certaines fonctions macroscopiques demeurent uniformes dans le système et constants dans le temps et, de plus, ne sont pas modifiés lorsqu'on isole le système » (Mathieu et al., 1991, p.171). Ce concept peut être étendu au cas des systèmes non-isolés, comme les systèmes mécaniques pilotés, les systèmes biologiques ou sociologiques (Von Bertalanffy, 1969 ; Isaza Delgado & Campos Romero, 2006) et l'on parle généralement dans ce cas d'*équilibre dynamique*, de *régime permanent* ou encore d'*état stationnaire*. En termes mathématiques, discipline sur laquelle repose pour une bonne part l'automatique, on ne fait pas de différence et dans les deux cas, on est en présence d'un point fixe pour les équations (différentielles) décrivant le système¹¹, soit

11. Voir, par exemple, le cours de « Control and Dynamical Systems » de Richard M. Murray (California Institute of Technology) sur www.cds.caltech.edu/~murray/courses/cds101/fa02/caltech/

un *état stationnaire* (*i.e.* indépendant du temps).

La stabilité, elle, est une caractéristique d'un état d'équilibre ou de régime permanent (ou stationnaire) dans lequel le système tend à demeurer (Mathieu et al., 1991, p.489). C'est-à-dire que le système revient à son état d'équilibre (ou d'état stationnaire) de manière autonome, après un déplacement momentané de celui-ci, sans action extérieure supplémentaire, au bout d'un temps fini. Mathématiquement, il s'agit d'une caractéristique du comportement des solutions des équations du système dans le voisinage du point d'équilibre que l'on peut, généralement, définir à l'aide d'un critère algébrique¹². Ces deux concepts sont donc intimement liés.

La définition du concept d'équilibre est le fruit de longs développements, basés principalement sur l'étude des systèmes mécaniques, depuis l'époque grecque classique jusqu'au début du XX^e siècle. En ce qui concerne la stabilité, ce n'est qu'à partir du moment où l'on a identifié, et défini de manière formelle (mais non mathématique), l'état d'équilibre, que l'on s'est posé la question de savoir comment évoluait cet état, lors d'une petite modification de celui-ci (on dirait aujourd'hui une *perturbation*), ce qui n'eut pas lieu avant le XIV^e siècle¹³ (Renn & Damerow, 2012c).

Nous allons présenter tout d'abord quelques éléments historiques, relatifs au développement de ces concepts, puis examiner les définitions actuelles de ceux-ci, le tout, avec une vision résolument orientée vers le contrôle des systèmes.

1.2.1 Éléments historiques

Le survol historique de ces concepts, ne se veut absolument pas exhaustif. Les développements mathématiques de ces concepts sont assez récents dans l'histoire de la science et liés aux développements théoriques de ceux-ci, qui sont relativement complexes car touchant plusieurs domaines (de la mécanique classique à la thermique) et liés à de nombreux autres concepts¹⁴ tout au long de cette longue genèse. Notre but est de faire découvrir une partie de cette complexité, et non de la traiter dans le détail. Pour une vision plus large, le lecteur pourra trouver, par exemple, dans (Duhem, 1905a,

pph02-ch19-23.pdf.

12. Par exemple, une analyse de valeurs propres d'une matrice ou de racines d'un polynôme.

13. Le sens physique de ce terme apparaît seulement à cette époque, selon le portail étymologique *Online Etymology Dictionary*, www.etymonline.com

14. Comme celui d'*attraction gravitationnelle*, par exemple, ou de *force*, si l'on se restreint à la mécanique.

1905b), un panorama des développements de la Statique¹⁵ depuis la période grecque jusqu'au XVIII^e siècle et dans (Renn & Damerow, 2012c, 2012b, 2012a) un point de vue plus « moderne » sur la mécanique médiévale.

D'Aristote à Archimède

C'est l'étude de la balance qui a fourni la base des premiers développements du concept d'équilibre : d'abord celle de la balance à bras égaux (utilisée dès l'Égypte ancienne, voir figure 1.1) qui fait l'objet d'un traité d'Aristote¹⁶, bien avant celui d'Archimède, puis celle des balances à fléau mobile qui se généralisent à l'époque Romaine (Guitard, 1934) mais que les grecs connaissaient déjà, car elle furent inventées au IV^e siècle av. J.-C.

Le concept d'équilibre est, cependant, mondialement associé à Archimède de Syracuse,



FIGURE 1.1 – Papyrus égyptien du Musée du Louvre. Le pèsement des âmes (La Grande salle de la Vérité) et La coupe d'Archésilas (BNF). Pesage du Sylphion (Ferula Narthex)(Coupe grecque du VI^e siècle av. J.-C.).

plus communément appelé Archimède, qui serait né aux alentours de 287 av. J.-C. En fait, seule la date de sa mort, provoquée par un soldat Romain durant le siège de Syracuse en 212 av. J.-C., fait consensus. Considéré par certains comme le plus grand mathématicien de l'Antiquité, bien peu d'éléments de la vie de ce savant de l'époque hellénistique sont en fait connus (Beauzamy, 2011). La première compilation de ses écrits, faite par Isodore de Milet¹⁷, et les premiers commentaires de son œuvre ne verront le jour qu'au cours du VI^e siècle. D'ailleurs, un des premiers commentateurs d'Archimède fut Eutocius

15. La « Science de l'équilibre », selon une terminologie moderne.

16. 384-322 av. J.-C.

17. Mort avant 558 ap. J.-C.

d'Ascalon, un géomètre d'Alexandrie du VI^e siècle, disciple d'Isidore de Milet.

« Ἐπιπέδων ἰσορροπιῶν ἢ ζέντρα βαρῶν ἐπιπέδων ἅ » est le titre de l'un des traités attribués à Archimède qui marque un tournant dans la compréhension du concept d'équilibre car il contient une des premières démonstrations mathématiques de la loi des leviers. Ce titre contient déjà « Le » terme central ἰσορροπία (isorrhopia), dont les diverses interprétations ou traductions ont pu conduire à des « non-sens » physiques au regard de la science contemporaine.

A cette époque, le terme « équilibre » ne correspond bien évidemment pas à notre conception physique de l'équilibre. L'utilisation de la balance pour comparer les masses des objets (essentiellement des marchandises dans une optique de commerce) conduit à ne considérer que la position horizontale des fléaux des balances comme digne d'intérêt, puisque c'est cette position qui marquait l'égalité des quantités pesées. C'est donc tout naturellement, que la science de la mesure des masses, naissante, va ne s'intéresser qu'à cette seule position. On peut noter aussi que la différenciation entre masse et poids n'étant pas encore définie, la traduction des traités grecs et latins conduit à un mélange sans distinction entre les termes de « poids » et « masse » actuels. Dans un premier temps, le « poids » des anciens correspondants d'ailleurs plutôt au concept de « masse » actuelle (c.-à-d. une quantité de matière) qu'à celui de « poids » (c.-à-d. la force qui s'exerce sur l'objet). Il n'est donc pas étonnant que l'étymologie du mot « équilibre » soit très emprunte de cet amalgame : *aequilibrium*, exactitude des balances, équilibre, nous dit¹⁸ Montesquieu dans *l'Esprit des lois* (1748), composé de *aequus* « égal » et *libra* « balance », tiré du grec ancien λίτρα, *lítira* « mesure de poids grecque utilisée en Sicile ». Il convient donc de modifier la terminologie employée dans certains ouvrages anciens, si l'on veut s'en servir en classe de manière adéquate.

Or, si l'utilisation des balances à bras égaux permet bien d'obtenir un équilibre horizontal avec deux objets de masse identique, il va tout autrement avec une balance de type Romaine (voir figure 1.2). Pour cette dernière, en effet, il n'y a pas nécessairement égalité entre la masse mobile et la masse de l'objet que l'on pèse lorsque le fléau est horizontal. Cette constatation a conduit au premier énoncé de la loi des leviers. Cette constatation empirique, fut énoncée et démontrée avant Archimède, par Aristote, qui en fit une démonstration « dynamique » (avec les *virtus*) dans ses Μηχανικά Προβλήματα (*Problemata Mechanica*). On en trouve aussi une démonstration élégante (Duhem,

18. Source : Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales



FIGURE 1.2 – Stratera romaine, Parville, IIe siècle

1905b, p34) attribuée à Euclide¹⁹, retrouvée dans un manuscrit Arabe composé en 970. L'énoncé et la démonstration d'Archimède restent cependant les plus cités, examinons-en quelques aspects.

On trouve principalement trois traductions du traité d'Archimède (qui compte deux livres) : la traduction française de F. Payrard (1807) dans laquelle le titre du traité est « De l'équilibre des plans ou de leur centre de gravité », celle en latin de Heiberg (1913) « *De planorum aequilibriis siue de centris gragrauitatis planorum* » et celle en anglais de Heath (1897), « On the equilibrium of planes or the centers of gravity of planes ».

Dans le livre I, la première « demande » (α') ne pose pas de problème particulier : « Des graves égaux suspendus à des longueurs égales sont en équilibre », c'est finalement la définition de l'équilibre tel qu'il est admis à l'époque - égalité des « quantités de matière » - et il n'y a pas non plus de contradiction avec la physique actuelle.

Le premier problème surgit dès la deuxième « demande » : « Des graves égaux suspendus à des longueurs inégales ne sont point en équilibre, celui qui est suspendu à la plus grande longueur est porté en bas »²⁰. Si l'on considère que l'équilibre de l'époque caractérise *l'égalité des masses des objets* (les « graves », une quantité de matière, rappelons-le) alors on abouti ici à une contradiction : deux objets de masse égale ne sont plus « d'égale masse » s'ils sont suspendus à une balance à bras inégaux !

Cette contradiction pourrait être levée en considérant, comme l'a fait Henry Mendel²¹ que la traduction du terme grec ισορροπία , présent dans le manuscrit d'Archimède, n'est pas « équilibre » (dans le sens de « égalité des masses ») mais « égale inclinaison » (ou

19. 325-265 av. J.-C.

20. On se réfère ici à la traduction de Payrard.

21. Du Department of Philosophy de la California State University, Los Angeles

incliné également). Ceci revient à considérer qu'à l'époque d'Archimède, le terme traduit par « en équilibre » signifiait plutôt « qui rend la balance horizontale », ce qui permet de comprendre les deux « demandes » précédentes sans difficultés et paraît correspondre mieux au caractère pratique de cet outil. Notons, aussi, que le terme *équilibre* étant étymologiquement basé sur un terme latin (voir l'étymologie de ce mot en annexe A.1), l'interprétation du terme *ισορροπία* (isorrhopia) par *équilibre* relève d'un anachronisme. Nous n'allons pas entrer plus loin dans les détails de l'interprétation de ces écrits, qui, comme le rappelle Beuzamy (2011) ont souvent été traduits mot-à-mot par des non scientifiques, ce qui a pu conduire à des contre-sens ou des simplifications malheureuses. Il est par contre intéressant de remarquer deux choses :

- La « loi des leviers », est très présente à l'école primaire (elle figure dans les programmes de la partie relative aux « Leviers et balances », voir la section 4.3, page 76) et le nom d'Archimède est associé presque uniquement à la première « demande » de son traité qui est ensuite utilisée maladroitement, comme définition de l'équilibre²², par exemple, au lieu de préciser qu'il s'agit d'une configuration possible, qui dépend du type de balance utilisé et qu'un équilibre non horizontal est possible. Un contemporain (inconnu) d'Euclide avait d'ailleurs énoncé cette même loi (empirique) en parlant, non d'équilibre, mais de « parallèle à l'horizon » (Duhem, 1905b, p.36). Si l'on tient absolument à relier l'étude de la balance et des leviers à des éléments historiques, le choix de ce type de formulation, horizontal par exemple, induirait beaucoup moins d'interférences avec le sens physique actuel d'*équilibre*.
- La formulation « dynamique » d'Aristote, dont on a cru à un certain moment qu'elle avait inspiré ultérieurement les savants de la mécanique moderne, bien plus que celle d'Archimède (selon Duhem), serait, elle aussi, sans doute plus féconde aujourd'hui en classe car elle place d'emblée l'étude de la balance dans un contexte dynamique, et permet d'approcher les causes de cet état (par des considérations basées sur les travaux virtuels, c'est-à-dire les déplacements).

La « science des poids » médiévale

C'est à Jordanus de Nemore (ou Jordanus Nemorarius, 1225-1260), l'un des plus grands mathématiciens du moyen âge, que l'on doit l'un des premiers grands traités sur

22. Par un procédé subtil : dans un nombre important de cas, on énonce la loi et on présente un seul exemple d'équilibre horizontal.

l'équilibre : le *Liber de ratione ponderis*.

Le point de départ des travaux de Jordanus en mécanique (terme moderne dont « la science des poids » est une des principales composantes à l'époque) est probablement (Renn & Damerow, 2012c) le *Liber karastonis* attribué à Thābit Ibn Qurra dans une traduction de Gerard de Crémone²³ ainsi que le *Liber de canonio*, une traduction latine d'une source grecque. Ces deux textes traitent tout deux des balances à fléau. Le *Liber karastonis* donne une preuve de la loi des leviers dans la tradition aristotélécienne et le *Liber de canonio* est centré sur la poutre matérielle (le fléau).

Trois grands traités sur la « science des poids » sont attribués à Jordanus : Le *Elementa super strationem ponderum*, le *Liber ponderibus* et le *Liber de ratione ponderis*.

Il est considéré par beaucoup comme le fondateur de la Statique.

La Physique moderne

On doit à Simon Stevin²⁴ la généralisation du principe du levier. Ceci lui permet de traiter l'équilibre sur un plan incliné. Il utilise la notion de déplacement virtuel qui sera reprise ensuite par Galilée et dégage les premières notions d'équilibre stable, instable et indifférent (mais sans les nommer). Dans le quatrième volume de ses *Oeuvres mathématiques* (1634), qui traite de « L'Art pondénaire ou de la Statique », il donne une définition faisant apparaître pour la première fois la considération d'une différence entre masse et poids. Voici ce qu'il dit (Stevin et al., 1634, p. 435) à propos de deux masses suspendues à un fléau horizontal (ce qu'il considère comme l'*équilibre*) :

[...] Ceste equilibration doit estre necessairement estenduë , & distinguée d'avec la propre equiponderance des pesanteurs , car il y a de la difference : [...] toutefois ils semblent estre de pesanteur egale , mais ce n'est pas leur propre pesanteur seulement , mais aussi leur disposition.

Stevin énonce alors que si l'on suspend une barre par son centre de gravité, elle peut être positionnée dans n'importe quelle position mais que si le point de suspension est plus bas ou plus haut, à partir d'une position inclinée la barre tournera jusqu'à l'alignement du centre de rotation (qu'il appelle le *point stable*) et du centre de gravité.

Cependant, ce n'est qu'à la fin du XVI^e siècle qu'une controverse va, selon certains auteurs comme Renn et Damerow, faire avancer la mécanique d'un grand pas. Elle a

23. Gerard de Crémone, 1114-1187

24. 1548-1620

pour objet une question à laquelle Stévin avait déjà répondu : le fléau d'une balance équilibrée retourne-t-il à l'horizontal spontanément après avoir été déplacé en position oblique ou reste-t-il dans cette position ?

On en trouve trace dans une édition du *Diversarum speculationum mathematicarum et physicarum liber*²⁵ de Giovanni Battista Benedetti²⁶ annotée par Guidobaldo del Monte²⁷, un des meilleurs experts de la mécanique de la génération pré-galiléenne, lui-même auteur d'un des textes les plus influents de la renaissance, le *Mechanicorum liber*. Nous renvoyons le lecteur vers (Renn & Damerow, 2012c, 2012b, 2012a) pour une étude complète de cette controverse qui selon ses auteurs a, sans conteste, été une source d'inspiration pour la science du mouvement développée juste après par Galilée²⁸. Ce texte fut pour nous aussi une source d'inspiration, principalement pour la construction de notre test informatique car on y trouve des balances *coudées* qui servent de support aux raisonnements de Benedetti et del Monte. Il expose aussi clairement les problèmes qu'il faut résoudre pour acquérir les connaissances nécessaires pour répondre à cette question.

Plus tard, dans la partie relative aux définitions de sa *Nouvelle Mécanique ou Statique*, Varignon (1725)²⁹ donne une définition non de l'équilibre d'un corps (vu comme l'état de celui-ci) mais de forces :

V. Deux ou plusieurs forces sont dites *en Equilibre* entr'elles , lorsqu'agissant l'une contre l'autre, ou contre, un obstacle commun , elle ne l'emportent ni l'une sur l'autre, ni sur cet obstacle ; c'est-à-dire, lorsque tout demeure en repos , nonobstant l'action de ces forces ou puissances l'une contre l'autre, ou contre l'obstacle qui les arrête, & qu'on appelle *Appui*.

Même après Newton³⁰, la prise en compte du mouvement rectiligne uniforme dans les situations d'équilibre n'est pas immédiate. A la fin du XVIII^e siècle, on note par exemple certaines définitions assez peu précises comme celle du Dictionnaire de Physique, tome 3, d'Aimé-Henri Paulian paru en 1787 : « Equilibre : Deux forces sont en équilibre, lorsque l'une ne l'emporte pas sur l'autre. »

Presque un siècle plus tard, on trouve encore des conceptions marquant une opposition Équilibre/Mouvement chez Carnot avec une conception de la *force* comme la « cause qui

25. Datant de 1585

26. 1530-1590

27. 1545-1607

28. Galileo Galilei : 1564-1642

29. 1654-1722.

30. 1643-1727

imprime les mouvements ». Par exemple, dans son traité intitulé *Principes fondamentaux de l'équilibre et du mouvement* - dont le titre est éloquent - on peut lire que la Mécanique est la théorie des forces (force = cause des mouvements) ou théorie des mouvements (force = quantité de mouvement) ou des lois de communication des mouvements et que : « Le statique considère l'état d'équilibre, c'est à-dire, l'état d'un système de corps qui demeure en repos, malgré la tendance que chacun d'eux a à se mouvoir. » (Carnot, 1803, p.9).

Cependant, Carnot en donne une définition plus loin dans ce même traité qui semble considérer la statique comme un cas particulier de la dynamique :

37. L'idée de la quantité de mouvement est fondée sur une expérience très-simple. C'est que si deux corps parfaitement durs, deux globes, par exemple, ayant même masse, viennent à la rencontre l'un de l'autre avec des vitesses directement opposées et égales, non seulement il s'arrêteront subitement au moment du choc, mais encore, que si on vient à doubler, tripler, quadrupler &c. la masse de l'un, pendant qu'on doublera, triplera, quadruplera, &c. la vitesse de l'autre, le mouvement sera encore détruit ; et c'est cette destruction générale de tout les mouvements qu'on nomme équilibre (15). (p.22)

Mais à de nombreux endroits du document, un même concept (celui de *force*) est nommé différemment (*force motrice* ou *force de pression*) selon que l'état du corps considéré est le repos ou le mouvement, par exemple :

48. On appelle *force motrice*, *force de pression*, [...], la pierre tombe d'un mouvement uniformément accéléré. C'est la vitesse qu'il acquiert ainsi pendant un temps donné, divisé par ce temps, qu'on nomme *la gravité* ou *la pesanteur* : cette gravité ou pesanteur est la force accélératrice ; c'est le produit de cette même gravité par la masse du corps qu'on nomme son *poids* ; et ce poids est la *force motrice* ou la *force de pression* du corps. Ces deux expressions sont synonymes ; mais celle de force motrice se rapporte plus particulièrement à l'état de mouvement du corps, et celle de force de pression, à son état de repos ou plutôt d'équilibre (p.28-29).

On peut cependant noter que Carnot cite le principe d'inertie p.53 : « Cette hypothèse est le principe connu sous le nom de *loi d'inertie* ; et on l'exprime ordinairement, en disant que tout corps persévère dans son état de repos ou de mouvement uniforme et rectiligne, jusqu'à ce qu'il reçoive l'action d'une puissance étrangère. ».

Ceci incite à penser que ces deux états ne sont pas encore compris comme un seul, correspondant à une conception de l'équilibre comme « un état pour lequel l'accélération

du corps est nulle ».

Poinsot³¹ fera encore en 1873 la distinction entre équilibre et repos dans ses *Éléments de Statique* (Poinsot, 1873, p.4) :

Rigoureusement parlant, un corps en équilibre est dans le même état que s'il était en repos ; car l'effet des forces étant anéanti pour toujours, ou s'anéantissant à chaque instant si les forces sont sans cesse renaissantes, tout corps en équilibre est actuellement capable de se mouvoir en vertu d'une certaine force donnée, absolument comme il se serait mû en vertu de la même force, s'il eut été en repos. Cependant on peut distinguer l'équilibre d'avec le repos, en ce que, dans le second cas, le corps n'est sollicité par aucune force, au lieu que, dans l'autre, il est sollicité par des forces qui s'entre-détruisent. Cette distinction, qui est nulle dans l'état rigoureux des choses, devient sensible dans les équilibres que la nature nous offre : presque aucun corps n'est exactement en équilibre, et lorsqu'il nous paraît dans cette situation, il existe néanmoins entre les forces qui le sollicitent une lutte perpétuelle qui le fait osciller infiniment peu, et le ramène continuellement à une position unique qu'il abandonne toujours. Mais, *dans la solution mathématique des problèmes, on doit regarder un corps en équilibre comme s'il était en repos ; et réciproquement, si un corps est en repos, ou sollicité par des forces quelconques, on peut lui supposer appliquées telles nouvelles forces qu'on voudra, qui soient en équilibre d'elles-mêmes, et l'état du corps ne sera point changé.*

On verra bientôt de nombreuses applications de cette remarque.

Ou encore « [...] quelles doivent être les relations des forces, pour que le système auquel elles sont appliquées prenne un mouvement égal à zéro, c'est-à-dire demeure en équilibre. ». Cependant, Poinsot essaie de concevoir le repos comme un état particulier du mouvement (une tentative d'unification) : « [...] de sorte que l'état d'équilibre des corps reste comme un moment singulier de l'état de mouvement, où la mesure des forces par leurs effets et leurs effets mêmes ont disparu. ». On a ici une définition moderne, plus claire, de l'état de repos et de celui d'équilibre, cependant très dépendante des concepts de mouvement et de force et pas seulement de celui d'accélération.

Nous aurions pu évoquer plus longuement Newton ou nombre d'autres savants illustres qui ont contribué à ces développements, mais ce bref aperçu, avait pour seul but de permettre de prendre la mesure du long chemin parcouru depuis l'étude de la balance à l'époque d'Aristote jusqu'à la fin du XIX^e siècle pour appréhender le concept

31. 1777-1859

d'équilibre, en mécanique, et combien il fut tributaire des avancées dans la compréhension de plusieurs autres concepts comme celui de *force*, de *gravitation*, de *mouvement* ou de *moment*.

Il faut attendre une mathématisation plus poussée et rigoureuse de la physique pour que la caractéristique principale de l'équilibre liée à la représentation d'un système par un ensemble d'équations différentielles (ou aux dérivées partielles) émerge. Ce sont des mathématiciens qui, à la suite des travaux de Lagrange³² (considéré par Duhem, 1905b, comme l'unificateur de tous les courants qui ont entraîné la Statique) sur les équations du mouvement, permettent finalement le développement de ce type d'approche pour la stabilité d'un équilibre, à la fin du XIX^e siècle, comme E. Routh³³, A. Hurwitz³⁴ ou A. Lyapunov³⁵. Ce dernier propose une méthode pour établir la stabilité d'un système – non linéaire – en cherchant une fonction³⁶ remplissant des conditions particulières (Lyapunov, 1992) qui rappellent celles que doit vérifier l'énergie potentielle d'un système en mécanique. Malheureusement, ses travaux ne seront diffusés que dans les années 60³⁷ (Lewis, 1992).

La théorie générale des systèmes et la cybernétique

Bien que des systèmes de régulation³⁸ aient existé depuis l'antiquité (Mayr, 1970), on peut considérer que c'est le mathématicien et physicien Maxwell³⁹ qui lance l'étude mathématique des régulateurs dans son article intitulé « On governors » (Maxwell, 1868). C'est à ce moment là, que l'histoire de l'automatique (l'étude et la commande des systèmes asservis, c'est-à-dire qui comprennent une boucle de rétroaction), rencontre les mathématiques (et la mécanique). Pour plus de détails, on trouvera dans (Mayr, 1970) un panorama complet des développements du concept de boucle de régulation⁴⁰, de

32. 1736-1813

33. 1831-1907

34. 1859-1919

35. 1857-1918

36. Dite *fonction de Lyapunov*.

37. L'article original publié par la *Mathematical Society of Kharkov* date de 1892 et sa traduction en français est parue en 1907.

38. D'abord pour mesurer le temps et réguler des niveaux de liquide, puis des températures ou des pressions

39. 1831-1879

40. qui correspond au « feedback control » de l'anglais

l'antiquité jusqu'à la machine de James Watt⁴¹, apparue vers la fin du XVIII^e siècle. Dans les deux ouvrages de Bennett (1979, 1993) on trouvera la suite de ces développements pour les périodes 1800-1930 et 1930-1950. De plus, dans sa thèse, Remaud (2004) dresse un panorama historique de l'automatique, dans lequel on peut noter l'apport de la théorie des systèmes dans la résolution des problèmes de régulation de la fin du XIX^e siècle. Mais, en l'absence d'outil théorique à leur disposition, il constate que les ingénieurs de la fin du XIX^e et du début du XX^e siècle ne peuvent « tirer de là des conclusions un peu générales » et surtout « se heurtent à des difficultés d'interprétation souvent insurmontables ». Dans la pratique, on se borne à « la vérification du fonctionnement d'une machine donnée avec un régulateur donné ». C'est le cas, par exemple, au tout début du XX^e siècle dans le domaine des télé-communications (Black, 1934 ; Nyquist, 1932), où les boucles de régulation commençaient à être très utilisées du fait de l'essor de l'électronique, mais ces développements n'ont pas dépassé leur domaine d'application avant l'après-guerre.

En effet, c'est au milieu du XX^e siècle que des liens, sur la base de ces concepts, ont été faits entre les diverses disciplines du domaine des sciences dures ou de l'homme, principalement à la suite du cycle des conférences Macy (1942-1953)⁴² qui regroupent, anthropologues, mathématiciens, psychiatres, neurobiologistes, informaticiens et sociologues. Les travaux menés alors, principalement contre les idées *mécanistes*⁴³ de la fin du XIX^e siècle, ont conduit à la naissance des *mouvements*⁴⁴ dits « systémiques » comme celui de la Cybernétique (dont l'automatique est une branche) (Wiener, 1948) ou des sciences cognitives et plus spécifiquement à la Théorie Générale des Systèmes (Von Bertalanffy, 1969) qui propose une vision unifiée de ces concepts pour toutes les domaines. Cette approche, ou paradigme scientifique, comprend principalement trois aspects : la science des systèmes (dans laquelle apparaissent les disciplines), la technologie des systèmes (dans laquelle s'inscrit l'automatique) et la philosophie des systèmes (qui propose une vision « holistique » des phénomènes, dans laquelle il est considéré que la connaissance des parties ne suffit pas à comprendre le tout - le système, il faut aussi prendre en considération les relations entre ces parties).

41. 1736-1839

42. voir <http://www.asc-cybernetics.org/foundations/history/MacySummary.htm>.

43. C'est un courant philosophique et un paradigme scientifique qui considère que la compréhension de tous les phénomènes naturels pourraient se déduire de principes simples (comme des relations de cause à effet). On considère que Descartes et Mersenne en sont à l'origine. En psychologie, cette vision est proche de la vision *atomistique*.

44. En tant que courant de pensée.

Du fait de ces rapprochements, l'automatique, et plus généralement les approches systémiques, connaissent des applications fructueuses dans quasiment tous les domaines où l'on est susceptible de modéliser et/ou *contrôler* « quelque chose » (le dosage d'un médicament pour un patient, une réponse adaptée face à un problème de couple, l'accélération d'un ascenseur, la température d'un four, la demande en énergie d'une région, etc.). Fortement mathématisée, cette discipline est enseignée dans le supérieur où elle fait aussi l'objet de recherche poussées.

1.2.2 Système et « approche systémique »

Avant d'aborder le concept d'équilibre de manière plus précise, il convient tout d'abord de définir la notion de *système*. On utilisera dans la suite le terme *système* pour désigner un objet ou un ensemble d'objets physiques réels ou symboliques, le modèle, qui permet de représenter l'évolution d'un ensemble de grandeurs d'intérêt liées entre elles. On représente généralement ces liens sous la forme d'un ensemble de fonctions (des relations mathématiques) liant tout ou partie des grandeurs caractéristiques de ce système (Von Bertalanffy, 1969).

Un *système* peut donc être un organisme vivant, un groupe d'individu d'une population plus large (animaux, employés, etc.), une solution chimique, des relations financières entre des clients et des fournisseurs, une famille, un objet physique comme une voiture ou une balance, une aire du cerveau ou la Terre munie de son atmosphère, etc. Tous étant modélisés de façon fine ou grossière, par un ensemble de relations, d'équations, généralement différentielles mais pas seulement⁴⁵, liant les grandeurs qui nous intéressent, certaines étant considérées comme des *entrées* sur lesquelles on peut agir pour modifier l'état interne du système, et d'autres comme des *sorties* que l'on peut mesurer le cas échéant et qui sont les grandeurs que l'on souhaite « piloter ». Bien sûr, tous ces systèmes sont de nature diverses, et l'on peut les classer dans des catégories différentes, selon que le système étudié est considéré comme ouvert ou fermé⁴⁶, si les équations sont linéaires ou non, etc. et dans chaque discipline, un découpage spécifique est encore possible (par exemple en mécanique, les systèmes statiques ou dynamiques).

Étant donné l'étendue des éléments à prendre en considération pour définir un système, dans les questionnaires utilisés dans notre étude, nous avons systématiquement défini

45. Par exemple des équations aux dérivées partielles.

46. C'est-à-dire si le système reçoit ou non des « informations » de l'extérieur selon la terminologie de la Cybernétique.

aussi précisément que possible les systèmes étudiés, afin d'éviter des incompréhensions supplémentaires. Dans l'ingénierie didactique proposée en deuxième partie, une discussion de cet aspect sera incluse pour sensibiliser les étudiants à cet aspect.

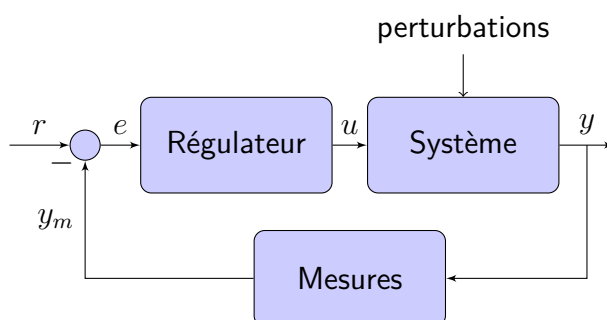


FIGURE 1.3 – Schéma d'une boucle fermée

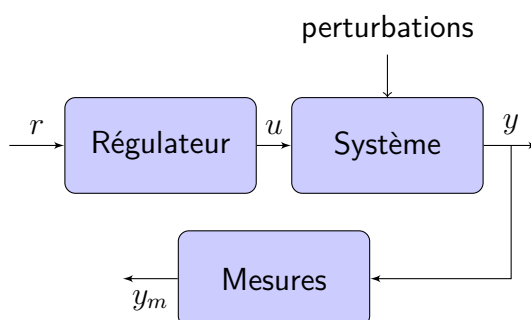


FIGURE 1.4 – Schéma d'une boucle ouverte

Un système est dit *libre* lorsqu'il n'est pas commandé, soit parce qu'il n'existe pas d'entrée, soit parce que l'entrée est fixée à une valeur nulle. Un pendule pesant est un exemple de système mécanique libre.

Lorsque l'une ou plusieurs des sorties, comprenant ou non celle ou celles dont on veut contrôler la valeur, est reliée à l'entrée du système par un dispositif adéquat, appelé régulateur (ou correcteur), le système est dit *bouclé* ou en *boucle fermée*. Dans le cas contraire, il est dit en *boucle ouverte* (voir figures 1.3 et 1.4). La valeur cible, souhaitée, de la sortie est appelée *consigne* ou *référence* (r sur le schéma) et est comparée à la valeur courante de cette même sortie (en fait la mesure de cette valeur, y_m , transmise en général par un *capteur* qui est lui-même un sous-système du système considéré), formant un signal appelé *erreur* (e), mesurant l'écart entre la valeur souhaitée et celle réalisée. Le signal d'erreur est en général fourni à un dispositif, le *régulateur*, qui se charge de

fabriquer un signal (u sur le schéma), souvent appelé la *commande*, qui va être envoyé en entrée du système à commander.

Un système en boucle fermée muni du correcteur, est lui aussi un système, que l'on peut alors étudier comme tel. Pour finir, beaucoup de systèmes libres (naturels ou non, comme la girouette, par exemple) peuvent être vus comme des systèmes bouclés (c'est-à-dire rétro-alimentés), moyennant une modélisation appropriée.

1.2.3 Équilibre et stabilité : quelques définitions

D'un point de vue mathématique, l'équilibre d'un système ou *l'état d'équilibre* d'un système est défini par l'existence d'un point fixe (pour les fonctions solutions du système) pour l'ensemble des équations (différentielles) décrivant son évolution (il peut y avoir plusieurs de ces points fixes). Les fonctions ou relations entre les grandeurs dans un système étant souvent dépendantes du temps, cela revient à définir un état stationnaire, c'est-à-dire indépendant du temps. En d'autre terme, un aspect du comportement d'un système en état d'équilibre, au bout d'un certain temps, est indépendant du temps en l'absence de perturbation venant de l'extérieur ou de modification de l'entrée. En général, une *position* d'équilibre est un point de l'espace vectoriel généré par l'ensemble des équations différentielles décrivant le système, il s'agit donc généralement d'un vecteur - non réduit à une dimension.

Par exemple, dans le cas d'un pendule pesant, les positions d'équilibre sont données par les couples $(\theta, \dot{\theta}) = (\{0 + 2k\pi, \pi + 2k\pi\}, 0), \forall k \in \mathbb{N}$ si θ est l'angle entre la verticale et la tige du pendule. En particulier, la donnée de l'angle seule, ne suffit pas à définir la position d'équilibre. Autrement dit, $\theta = 0$ n'est pas une *position d'équilibre* pour le système, c'est plutôt un couple comme $(\theta = 0, \dot{\theta} = 0)$ qui en est une.

En conséquence, le comportement d'un système **dans** un état d'équilibre est « identique », qu'il soit libre ou commandé, c'est un état stationnaire. Attention, ceci ne veut pas dire que le comportement du système pour atteindre l'équilibre ou depuis le point d'équilibre soit le même dans tous les cas. Cela ne veut pas dire non plus que les caractéristiques de cet état d'équilibre sont rigoureusement les mêmes pour les systèmes libres et les systèmes commandés, nous allons voir où sont les différences dans la suite. Ceci ne veut pas dire, non plus, que toutes les variables du système complet doivent être constantes ou nulles à l'équilibre. Par exemple, si l'on s'intéresse à la vitesse d'un véhicule, le système qui nous intéresse - le véhicule - sera dans un état d'équilibre si sa

vitesse est constante (ce qui est concordant avec les lois de la mécanique classique). Bien entendu, la position du véhicule - son abscisse dans le référentiel lié au sol - sera une fonction croissante du temps, donc non constante (mais dans ce cas, cette grandeur ne fait pas partie des variable d'état du système tel qu'on l'a défini).

1.2.4 Équilibre ou *régime permanent* ?

Les exemples de systèmes que nous allons présenter dans les différentes situations et questionnaires qui vont suivre, sont majoritairement issus du domaine de la mécanique, ou étudiés dans ce domaine, qu'ils soient libres (comme la balance) ou commandés (un cube sur un plan incliné, un pendule sur un chariot, le corps humain, etc.)⁴⁷. Dans ce domaine, comme dans celui de la thermodynamique par exemple, on différencie l'état stationnaire d'*équilibre* de celui du *régime permanent*, par rapport au concept d'*isolement* du système : selon que celui-ci est isolé (fermé) ou non (ouvert), on appelle l'état stationnaire *équilibre*, dans le cas isolé, et *équilibre dynamique* ou *régime permanent* dans le cas non isolé. Rappelons que cette distinction fait référence au fait qu'il a ou non des transferts d'énergie⁴⁸ entre le système et le « milieu » extérieur (Von Bertalanffy, 1969). Dans la perspective qui est la nôtre, celle de l'automatique et des systèmes qui sont commandés ou qui peuvent l'être, et par là donc, qui reçoivent potentiellement de l'énergie venant de l'extérieur (donc un cas de non-isolement ou d'ouverture), il ne serait pas opportun de faire cette distinction. En effet, d'un point de vue mathématique, s'agissant de systèmes que l'on peut modéliser par un ensemble d'équations (souvent différentielles), cette distinction ne revient qu'à faire une différence entre une entrée constante nulle ou non nulle, soit, entre deux états stationnaires qui diffèrent seulement par la valeur d'une partie des variables du système⁴⁹. De plus, en automatique, où presque par définition, on ne s'intéresse qu'aux systèmes qui sont commandés, il est coutume d'appeler *équilibre*, les deux états stationnaires (Packard, Poolla, & Horowitz, 2002). Par extension, dans les cas relevant de la mécanique classique qui seront présentés, nous appellerons *équilibre* un équilibre statique ou dynamique (soit dans un référentiel galiléen ou non).

47. Plus précisément, il s'agit de systèmes *électromécaniques* dans les deux premiers cas commandés précités et *biomécanique* pour le dernier.

48. Ou des communications, des échanges d'informations, dans le cas de la cybernétique (Wiener, 1948) et plus généralement de la Théorie Générale des Systèmes.

49. En l'occurrence, celle correspondant à l'entrée.

Comment juger de l'équilibre d'un système

Face à un système quelconque dans une certaine position (dans l'espace d'état), il y a deux façon permettant de juger s'il est en équilibre, c'est-à-dire, dans un état d'équilibre :

- Trouver le ou les points fixes des équations qui le décrivent (de manière explicite⁵⁰ ou non)
- Observer certaines grandeurs et moyennant la connaissance de la nature du système⁵¹, de ses entrées et perturbations, vérifier si ces grandeurs varient ou non durant un *certain* temps

La première méthode, se décline dans tous les domaines (mécanique, chimie, thermique, etc.) par des critères calculatoires, des procédures, que l'on enseigne aux élèves. Par exemple, dans un exercice de mécanique classique, la formation du bilan des forces sur un système pour en déduire l'accélération puis l'équilibre, fait partie des procédures enseignées au lycée.

La deuxième « méthode », met bien en évidence l'influence du temps dans la caractérisation de l'équilibre. Cette approche n'est utilisable que si l'on dispose d'enregistrements de certaines variables du système, d'une vidéo ou de photos datées de celui-ci. Cependant, bien qu'étant peu énoncée spontanément par une majorité d'étudiants, elle coïncide très exactement avec le concept d'équilibre, et permet de caractériser un état d'équilibre dans toutes les disciplines.

Comment juger de la stabilité d'un système

La stabilité, de même que l'équilibre, peut se déduire du résultat de l'application d'un certain nombre de critères mathématiques généralement déclinés dans chaque discipline. La définition du Dictionnaire de physique (Mathieu et al., 1991, p.489) stipule que la stabilité est la « tendance d'un système à demeurer dans un état d'équilibre ou de régime permanent ». Plus précisément, et de façon qualitative, la stabilité d'un équilibre est une caractéristique de celui-ci, permettant de prédire l'évolution du système face à une *perturbation* ou un changement de la consigne (l'entrée du système, s'il est commandé). Une définition mathématique est cependant là aussi disponible, dont la traduction en

50. On qualifie d'explicite, la recherche des points fixes des équations décrivant le système, et d'implicite, la vérification d'un critère disciplinaire découlant de cette recherche de point fixe.

51. Ceci n'est utilisable effectivement que si l'on a un minimum de connaissance du système, s'il peut être considéré comme continu ou discret, par exemple.

termes non-mathématiques donne une méthode générale pour caractériser la stabilité dans toutes les disciplines. En effet, partant d'un état (ou position d'équilibre) il suffit d'*écarter*⁵² légèrement le système de cet état et d'observer s'il revient, sans actions extérieures, vers celui-ci, dans un temps fini, lorsque la perturbation cesse.

1.3 Le plan de cette étude

Dans la première partie, nous nous intéresserons aux difficultés des étudiants des cursus ingénieurs, face à certains problèmes mettant en jeu des équilibres. Ceci, afin de comprendre leurs raisonnements, et le lien qui existe entre ceux-ci et les situations qui les déclenchent. Pour étudier leurs *conceptions*⁵³ de ce qu'est l'équilibre et de la stabilité, nous allons, les placer face à des situations de mécanique classique originales, inédites pour ce type d'étude, comportant un aspect dynamique important. Cette confrontation permettra de provoquer chez les étudiants, l'utilisation de modes de raisonnements spécifiques, révélant leur compréhension de ces concepts. Nous ferons ensuite un point sur les connaissances académiques qu'ils possèdent sur le sujet en utilisant un questionnaire basé sur un découpage des connaissances très utilisé dans le milieu de l'évaluation, celui des connaissances déclaratives, procédurales et schématiques. Ceci nous permettra de mesurer la part de ces acquis dans les raisonnements utilisés face aux situations du premier chapitre de cette partie. L'examen, d'une part, des programmes (le curriculum prescrit) qu'ont suivi ces étudiants dans leur passé académique depuis les classes des niveaux primaires, et d'autre part, des expériences quotidiennes de ces concepts (tant au niveau empirique que langagier) nous donneront les éléments principaux permettant d'identifier une partie des sources du processus de formation de trois conceptions identifiées. A partir de tous ces éléments, et tenant compte des possibilités d'action à notre portée, nous avons décidé d'agir au niveau des cours d'automatique et de proposer une séquence courte de « remédiation ». Pour cela, dans la deuxième partie, nous proposerons une approche, une manière de comprendre l'équilibre et la stabilité à partir de sa définition mathématique, qui n'est pas totalement nouvelle, mais inutilisée dans l'enseignement classique. Cette approche nous est apparue tout à fait adaptée à la mise en place d'une ingénierie didactique, basée sur le paradigme du socio-constructivisme

52. En faisant agir une perturbation sur celui-ci.

53. Nous appellerons « conceptions », les réponses types à certaines classes de problèmes - de situations - rencontrés par les étudiants.

et sur l'approche cognitive de la Théorie des Champs Conceptuels. Cette ingénierie, proposée à des étudiants d'une université colombienne, vise l'amorçage d'un changement conceptuel chez eux, que l'on a tenté d'évaluer, de manière externe à l'ingénierie, par des schémas expérimentaux de type pré-test/post-test utilisant un questionnaire en ligne conçu spécifiquement pour cette approche. Ce travail est une contribution à un champs encore relativement peu exploré par la recherche en didactique, à l'interface entre l'automatique et la physique.

PREMIÈRE PARTIE

Les étudiants face aux concepts d'équilibre et de stabilité



Introduction

L'équilibre et la stabilité sont largement présents dans les curricula de physique français et étrangers tant au niveau élémentaire, secondaire que supérieur (étude des balances et leviers à l'école primaire française et belge et dans les « middle schools » américaines, du pendule pesant au collège et dans les « high schools », étude du pendule pesant dans le supérieur en France et à l'étranger).

Comme on l'a vu dans l'introduction, la vérification de l'état d'équilibre peut se faire de deux manières, soit en utilisant un critère dépendant du domaine considéré - en mécanique classique, par exemple, on peut former la somme vectorielle des efforts⁵⁴ extérieurs afin de vérifier si celle-ci est nulle, soit un critère empirique général directement issu de la définition, comme le fait de vérifier que l'état du système considéré demeure constant au cours du temps en l'absence de perturbations extérieures (Dans le cas d'un système commandé, l'entrée n'est pas considérée comme une perturbation extérieure mais elle doit cependant demeurer constante). On peut noter que ce critère est généralement utilisé sans le nommer dans les classes de niveaux inférieurs, lorsque l'on ne dispose pas des outils mathématiques adéquats pour appliquer un critère disciplinaire. Malheureusement, ce critère d'une portée très générale se réduit souvent à la vérification d'un sous-critère local comme celui de l'horizontalité d'un fléau de balance, ce qui ne va pas sans induire quelques conceptions erronées du concept, par induction « généralisante »⁵⁵.

En ce qui concerne la stabilité, ce n'est que dans les niveaux scolaires supérieurs (en France, au lycée et dans les « high schools » anglo-saxonnes) que l'on aborde ce concept, et le plus souvent en utilisant un critère énergétique, par exemple liés à l'énergie potentielle du système considéré dans le cas mécanique. Dans ce cas, on vérifie que l'énergie potentielle d'un système mécanique est extrémale lorsque que le système est

54. Forces et moments de ces forces.

55. L'induction est un processus d'inférence de lois générales ou de principes à partir de l'observation d'instances particulières. De récents modèles cognitifs considèrent que le cerveau fonctionne globalement par inférence, souvent inconscientes, et ce, grâce à un fonctionnement de type prédictif, basé sur des statistiques conditionnelles dite *bayésienne* (Friston & Stephan, 2007) ce qui peut poser certains problèmes de validité des connaissances construites par ce processus (Vickers, 2014).

dans un état d'équilibre, minimale dans le cas d'un équilibre stable et maximale dans le cas instable. Là encore, on peut employer un critère empirique directement issu de la définition générale de la stabilité : il suffit dans ce cas d'observer le comportement du système lorsqu'on l'écarte de sa position d'équilibre. Pour un système libre, on peut soit observer que le système revient à sa position initiale d'équilibre au bout d'un temps fini lorsque la perturbation disparaît, s'il s'agit d'une position (au sens « état ») d'équilibre stable, soit qu'il s'en écarte indéfiniment dans le cas d'un équilibre instable ou soit qu'il reste dans l'état où l'a placé la perturbation, dans le cas d'un équilibre indifférent.

Les évaluations dans le milieu scolaire visent surtout à vérifier la connaissance des formules (critères) et techniques de calcul afférentes à ces concepts dans chaque discipline, ce que les étudiants maîtrisent relativement bien. Ces évaluations ne sont donc pas à même de détecter les éventuels manques de compréhension de ces concepts et ceci, en général, repousse le moment où les difficultés apparaîtront puisqu'on considère, à tort, ces concepts maîtrisés pendant une bonne partie de la carrière académique des étudiants. Ce n'est que dans l'enseignement supérieur que ces difficultés de compréhension resurgissent lorsque les systèmes étudiés ne se présentent plus sous une forme classique. Peuvent alors se poser de réelles difficultés dans la compréhension des phénomènes complexes comme par exemple dans le cas des systèmes asservis ou régulés utilisés dans de nombreux domaines de l'ingénierie. De fait, ces concepts sont difficiles à appréhender et comme le précise Municio Pozo et Gómez Crespo (1998, p116), comprendre la nature d'un système en équilibre est peut-être l'une des réussites les plus importantes de la connaissance scientifique et implique de changer un des raisonnements les plus communs et donc des plus difficiles à modifier, lié au raisonnement linéaire causal (Fauconnet, 1981) qui consiste à se centrer sur les changements (actions) en oubliant les effets réciproques (réactions) qui assurent la conservation (Inhelder & Piaget, 1955). On peut donc dire que les causes de ces difficultés semblent complexes et profondes.

Les difficultés des élèves ingénieurs à propos des concepts d'équilibre et de stabilité

2.1 Introduction

Une partie de ce chapitre a été publié dans (Canu, de Hosson, & Duque, 2014). Dans ce chapitre nous allons chercher à caractériser les difficultés des étudiants face à ces concepts dans le cadre des enseignements de l'automatique¹. Dans un premier temps, nous allons examiner les quelques recherches antérieures sur ce sujet et ensuite, nous proposerons un moyen original d'identification des conceptions à partir de situations telles que l'on peut en rencontrer dans les cours d'analyse et commande des systèmes (autre dénomination de l'automatique), le tout, dans le domaine de la mécanique classique.

2.2 État de l'art

On peut noter que de nombreuses recherches explorent la question de la compréhension de ces concepts au delà de la simple connaissance des critères précités (bilan d'efforts, variation d'énergie, etc.) mais, centrés exclusivement sur celui de l'équilibre. Aucun, en effet, ne concerne la stabilité, sans doute considéré comme un concept « à part » (il est vrai que ce concept arrive tardivement dans le parcours académique des étudiants). Beaucoup de travaux ont exploré les difficultés des étudiants concernant la compréhension des concepts généraux de la physique – dont celui de l'équilibre – et ont tenté d'identifier les raisonnements alternatifs. Gunstone (1987) par exemple a constaté des difficultés de compréhension chez les étudiants dans le domaine de la mécanique et

1. Cet enseignement a majoritairement lieu en second cycle d'étude supérieures en France, parfois en premier cycle (en classe préparatoire, par exemple) et dans les facultés d'ingénierie à l'étranger.

particulièrement, en ce qui concerne l'équilibre, dans l'étude des systèmes statiques type poulies/masses. Il en a déduit que les étudiants pouvaient utiliser dans de nombreux cas des raisonnements explicatifs assez éloignés de ceux enseignés en classe. Albanese et al. (1998) examinent cette question avec un point de vue historique et en tentant de prendre en compte l'influence des situations réelles (de la vie de tous les jours), non scolaires, dans la construction des raisonnements des étudiants, que l'on appelle les *raisonnements spontanés* ou *du sens commun* (Viennot, 1979). Ils mettent en lumière notamment les aspects énergétiques et dissipatifs qui différencient les situations scolaires de celles de la vie quotidienne et qui peuvent influencer voire expliquer une partie des difficultés de compréhension de ces phénomènes.

Certaines études se sont intéressées aux mécanismes qui pourraient donner naissance aux raisonnements alternatifs des étudiants à propos des situations de physique en général et qui peuvent conduire aux difficultés rencontrées. Ce faisant, elles traitent soit indirectement de l'équilibre comme celle de Pozo et al. (1992) dans laquelle ils tentent d'organiser et de catégoriser les raisonnements alternatifs des étudiants sous forme de « mini théories ». Dans cette étude, les étudiants examinent des situations statiques simples (un livre sur une table, sur un ballon, sur un ressort, et.) et les auteurs ont pu identifier le rôle fort du contexte et l'apparente incohérence des raisonnements des étudiants face à des situations mettant en jeu le même principe physique.

D'autres travaux, sont centrés, eux, sur la question spécifique de la compréhension de l'équilibre. Certains à un niveau « psycho-développemental » de l'enfant dans la lignée des travaux de Piaget et Garcia (1971) comme Siegler et Chen (2002) ; Bonawitz, Lim, et Schulz (2007), d'autres à un niveau « undergraduate » comme ceux de Newcomer et Steif (2008) dans lesquels les étudiants se prononcent sur l'équilibre de systèmes statiques de poutres reliées par des fils, Ortiz, Heron, et Shaffer (2005) qui utilisent des systèmes statiques du type balance « prototypique » ou Flores-García et al. (2010) qui s'intéressent à des systèmes statiques du type poulies/masses et poulies/ressorts.

Si l'on met de côté les travaux sur les enfants - qui contiennent néanmoins des aspects intéressants que l'on est susceptible de retrouver chez les étudiants comme le raisonnement de base des moments de force ou de compensation distance/masse, de ces dernières études, il ressort là encore que les étudiants ont à propos de ces systèmes ou situations, des conceptions très dépendantes du contexte et de certains critères d'apparence : l'horizontalité d'un fléau semble être pour une majorité des étudiants, par exemple, l'unique critère d'équilibre pour un système de type balance (Ortiz et al., 2005), de même que

l'altitude identique de deux masses suspendues de part et d'autre d'une poulie (Gunstone, 1987). Quant à l'application des critères, règles ou méthodes scolaires comme la somme des forces et des moments, il apparaît dans ces travaux que les étudiants ont des difficultés à les appliquer toutes ensemble (Ortiz et al., 2005) (*i.e.*, soit ils jugent d'un équilibre en utilisant la somme des forces, soit en utilisant celle des moments) ou bien ils n'incluent pas la totalité des forces dans leur raisonnement : souvent des efforts considérés, à tort, comme « internes »² sont oubliés (Newcomer & Steif, 2008).

Comme on peut le constater, seuls les équilibres statiques sont abordés dans la littérature de recherche en didactique des sciences (si l'on se restreint au domaine de la mécanique) et le lien avec la stabilité n'est jamais questionné. Or, d'une part, si l'on peut « scientifiquement » dissocier ces deux concepts (c'est-à-dire parler d'équilibre sans parler de stabilité) rien ne dit que les étudiants adoptent sciemment et correctement cette stratégie ou cette séparation des concepts : leurs discours, relevés lors des cours ou lors d'entretiens, montrent souvent un amalgame entre les deux termes, qui est appuyé par certaines études dont celle de Pedreros Martínez (2013). D'autre part, les étudiants rencontrent dans leur vie quotidienne ou académique des systèmes en équilibre dynamique, le corps humain par exemple, sur lesquels on ne fournit aucun élément de compréhension, mais que l'on qualifie volontiers de « en équilibre », « stable », « déséquilibré », etc. ce qui peut laisser libre cours à des interprétations alternatives.

Nous prenons donc le parti de lier ces deux concepts afin d'explorer les liens qui les unissent dans l'esprit des étudiants. Notre étude est une contribution à l'étude des conceptions en mécanique et plus particulièrement à celles concernant l'équilibre et la stabilité, qui sont comme on l'a vu peu nombreuses. Nous allons interroger le rapport des étudiants à ces concepts dans un contexte inédit (inédit par la population interrogée : les étudiants des cursus ingénieurs, inédit par la situation choisie) ce qui, compte tenu des résultats précédents – aspect contexte-dépendant des raisonnements étudiants – est de nature à apporter des éléments nouveaux. Ce travail vise donc à enrichir l'existant mais également à orienter des stratégies d'enseignement afin de pallier les difficultés mises à jour ou afin de compléter l'approche en place actuellement dans les curricula. Nous voulons questionner ici directement « l'opérationnalité » des définitions physiques de ces concepts et tenter d'identifier les éléments qui perturbent un usage rationnel et pertinent de ces définitions.

Cette première étude vise à répondre aux questions de recherche suivantes : Quelle est

2. Alors que ce sont des efforts externes au système comme la réaction d'un pivot par exemple.

donc l'influence d'un contexte dynamique sur le raisonnement des étudiants à propos de l'équilibre et de la stabilité ? D'une part, ce contexte fait-il émerger de nouveaux modes de raisonnements ou des conceptions alternatives nouvelles par rapport aux résultats actuellement connus, et d'autre part, les élèves parviennent-ils plus, ou moins bien, à utiliser les critères qu'ils connaissent leur permettant de juger de l'équilibre et/ou de la stabilité d'un système dynamique donné ?

2.3 La collecte des données

Contrairement aux travaux de Newcomer et Steif (2008) et de Ortiz et al. (2005) nous allons proposer aux étudiants de se prononcer sur l'équilibre et la stabilité d'un système mécanique dynamique³.

2.3.1 Le cadre des « facets of thinking »

Ce changement de cadre de référence – statique/dynamique – doit permettre d'identifier de nouvelles *facettes* de connaissances (« facets of knowledge » chez Minstrell) relatives à ces concepts. En effet, dans le champs de la recherche sur les conceptions et raisonnements des étudiants, une théorie apparue dans les années 90 propose de relier ces conceptions et raisonnements aux situations problématiques rencontrées par les élèves (Minstrell, 1992b). Dans cette optique, ont été identifiés des sortes de raisonnements individuels, les *facettes*, que l'on peut regrouper autour de situations ou d'idées, les *clusters*. Ce point de vue partagé aussi par (DiSessa, 1993) dans sa théorie des *primitives phénoménologiques* (*p-prims*) provient de la constatation suivante : bien qu'étant inexactes au regard des théories généralement admises à une époque donnée, les raisonnements ou conceptions alternatives n'en sont pas moins pourvu d'une certaine organisation dans le système de pensée de l'individu. Ces alternatives au savoir de référence permettent généralement aux individus de résoudre certains problèmes dans certaines situations précises et ont donc, de fait, une valeur opérationnelle importante (ce qui justement constitue un obstacle important pour l'enseignement des théories scientifiques en milieu scolaire). Elles ne sont cependant pas basées sur des théories scientifiques. Mais le fait qu'elles dépendent d'aspects saillants (ou « de surface ») des situations, du contexte de celles-ci, permet de les comprendre comme des constructions de l'esprit, provenant de « morceaux

3. *i.e.*, qui peut être en mouvement accéléré par rapport à un référentiel donné.

» de connaissances plus élémentaires, les *p-prims* (diSessa, 1983, 1993), dotées d'une organisation d'un niveau limité et souvent abstraites des expériences communes. Le niveau des facettes est cependant différent de celui des *p-prims* dans le sens où elles sont moins élémentaires. Ce sont des unités de raisonnement d'une taille suffisante pour caractériser et analyser la pensée des étudiants à des fins d'enseignement ou d'évaluation et issues de la généralisation de ce que disent ou font les étudiants en classe. Elles peuvent donc être issues de la combinaison d'une quantité différente de *p-prims* ce qui en fait varier la spécificité : certaines sont très générales et issues directement d'une seule *p-prim* comme « plus implique plus » et d'autres en sont une combinaison et apparaissent plus dépendantes du contexte (Minstrell, 2000). Les facettes ont été regroupées en *clusters*, ensembles de facettes reliées les unes avec les autres et relatives à une même situation physique, idée ou concept (Minstrell, 1992a). Dans chaque *cluster*, les facettes reçoivent un numéro et sont organisées selon un ordre approximatif de développement qui correspond à la distance entre cette facette et le savoir de référence (0 pour « proche » et 9 pour le niveau le plus éloigné). Cet ordre indique aussi un certain niveau de difficulté pour l'étudiant qui en fait l'usage pour comprendre les concepts des *clusters* « voisins » (i.e. dont le thème est proche). Cette classification a pour but de guider les enseignants dans l'identification et/ou la prise en charge plus ou moins précoce de ces facettes dans leur enseignement dans le but de les amener à changer.

Il n'existe pas de *cluster* relatif à l'équilibre ou à la stabilité dans la littérature (une compilation des *clusters* et facettes existantes est disponible sur la page internet de Jim Minstrell référencé dans la bibliographie) mais plusieurs *clusters* du domaine de la mécanique font appel à différentes facettes relatives à l'équilibre ou à la stabilité que l'on est susceptible de retrouver dans un contexte d'équilibre dynamique. C'est notamment le cas des *clusters* « Forces to Explain the At Rest Situation » (41-) et « Forces During Interactions (47-) » :

- 410 Balanced forces on an « at rest » object (vector sum is zero).
- 411 At rest and constant velocity are relative.
- 412 "Balanced forces" can not apply to both constant velocity and constant position conditions of motion.
- 470 All interactions involve equal magnitude and oppositely directed action and reaction forces that are on the separate interacting bodies.

- 474 Effects (such as damage or resulting motion) dictate relative magnitudes of forces during interaction.
- 474-1 At rest, therefore interaction forces balance.
- 474-2 « Moves », therefore interacting forces unbalanced.
- 475 Equal force pairs are identified as action and reaction but are on the same object.

Certaines facettes des *clusters* relatifs au mouvement sont susceptibles aussi de fournir une base pour identifier les raisonnements des étudiants face à un système dynamique. Par exemple celles du *cluster* « Perception of Motion in Different Frames » comme « Component motions are added, but without discriminating accelerated motion from constant velocity motion » (362) ou de celles du *cluster* relatif à l'accélération comme « acc. is not differentiated from displacement or velocity ideas » (259).

Adoptant une méthodologie à mi-chemin entre celle de Newcomer et Steif (2008) et celle de Ortiz et al. (2005), nous allons placer les étudiants face à un même système dans plusieurs situations (configurations) et nous allons tenter d'identifier des unités de raisonnement communes chez tous les étudiants pour chacune de ces situations et les différences entre ces unités selon les situations dans lesquelles elles sont mobilisées. Les situations proposées feront appel à des éléments cognitifs chez les étudiants, mettant en jeu à la fois des aspects du niveau conceptuel (statique/dynamique, référentiel inertiel ou non) et d'autres liés à l'apparence ou à la configuration spatiale du système (vertical/horizontal/oblique). Pour ces derniers aspects, Ortiz et al. (2005) ont déjà identifié des modes de raisonnement spécifiques, relatifs à l'équilibre des systèmes de type « balance » que l'on va donc tenter de mettre en évidence ici (comme l'existence de positions « naturelles » pour le système considéré). Pour les premiers, on va s'appuyer sur l'article de Newcomer et Steif (2008) qui met en évidence des aspects non liés à la configuration du système comme la non prise en compte des efforts internes. On pourrait chercher ensuite à regrouper ces différents éléments d'un même concept dans un *cluster* spécifique cependant, cet aspect ne sera pas développé dans cette recherche.

2.3.2 L'instrument d'évaluation : questionnaire à choix multiple

Le système proposé aux étudiants est composé d'un pendule pesant rigide entraîné par un chariot mobile. C'est ici un dispositif « prototypique » (2.1), mais ce type de dispositif

est réellement présent dans de nombreux laboratoires à travers le monde et les étudiants peuvent donc être amenés à le rencontrer dans le cadre des cours d'automatique.

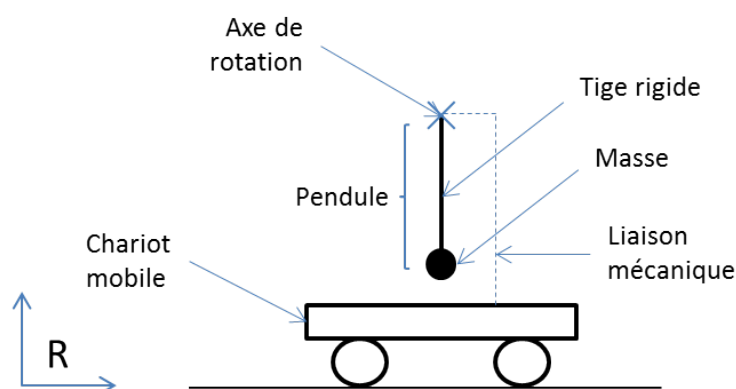


FIGURE 2.1 – Le système

Les étudiants de notre étude vont donc être confrontés à un système à la fois simple car somme de deux systèmes mécaniques déjà étudiés (le pendule pesant et un chariot mobile) mais dont la combinaison présente une situation inédite et donc le possible lieu de manifestations de raisonnements « non classiques », soit de nouvelles facettes, soit les fruits d'une combinaison nouvelle de facettes déjà étudiées. Le fait que la situation soit composée de deux systèmes connus nous permet d'espérer que les étudiants vont faire appel aux connaissances qu'ils possèdent relativement aux comportements individuels de ceux-ci. En ce sens, il ne s'agit pas d'une situation complètement nouvelle, ce qui les place dans un contexte académique familier, et évite donc une déstabilisation trop importante, favorisant le réinvestissements des acquis procéduraux⁴ (comme la formation d'un bilan de force) et déclaratifs⁴ (la seconde loi de Newton par exemple) antérieurs.

La situation proposée l'est au travers d'un questionnaire papier-crayon, comportant donc des figures statiques, et non d'une mise en situation réelle avec le système physique. Ce choix peut surprendre s'agissant d'une étude de systèmes dynamiques. En fait, il permet une application à grande échelle aisée mais aussi favorise la conceptualisation et l'application d'un raisonnement non directement issu d'une observation du comportement réel du système. Comme le font remarquer Albanese et al. (1998), il est vrai que les situations académiques épurées font apparaître des différences de comportement parfois importantes avec le même système (ou la situation) de la vie quotidienne qui sont susceptibles d'être une source d'incompréhension chez les étudiants (la présence ou non

4. (Solaz-Portolés & López, 2003).

des frottements par exemple). Cependant, de nombreuses études montrent aussi que l'observation d'un phénomène réel (naturel ou fruit d'une expérience), loin d'éclairer les étudiants, ne leur laisse souvent voir que ce que leur conceptions préalables les poussent à observer (Champagne & Bunce, 1985 ; Gunstone & White, 1981). Dans le cas des objets mobiles, comme le font remarquer Kariotoglou, Spyrtou, et Tselfes (2009, p.857) une expérience directe peut conduire à faire une différence, de manière automatique, entre le mouvement et le repos au lieu de considérer ce dernier comme un cas particulier du premier⁵. En effet, d'un point de vue de modélisation, les variables *vitesse* et *accélération* du mobile par rapport au sol peuvent prendre n'importe quelles valeurs, la nullité de l'une et/ou de l'autre peut certes impliquer des comportements particuliers « remarquables », et qui nous intéressent ici, mais ce ne sont que des valeurs possibles au même titre que les autres et l'on ne souhaite pas à ce stade que, par exemple, la vitesse soit privilégiée par rapport à l'accélération⁶. La difficulté pour percevoir de manière directe des grandeurs telles que la vitesse ou l'accélération du mobile et/ou du pendule est une circonstance aggravante de cet effet qui peut biaiser fortement la collecte d'information sur le système en influençant les étudiants dans le sens de leur conceptions erronées (Brewer & Lambert, 1993). Enfin, on peut noter que la confrontation de l'étudiant avec ce type de système, notamment à cause de la présence d'un axe de rotation, peut le conduire à surestimer l'effet des frottements sur celui-ci et à considérer qu'il est la cause principale de l'évolution du système dans un sens ou un autre ce qui va masquer le phénomène le plus important ici, relatif à la somme des efforts⁷ extérieurs et à leur nullité ou non. Il est intéressant de remarquer, de plus, que c'est en partie cette même difficulté, à laquelle ont été confronté Guidobaldo del Monte, Giovanni Battista Benedetti ou Galilée au cours du XVI^e siècle (Duhem, 1905a) au sujet de l'équilibre de la balance qui a empêché une bonne compréhension de ce phénomène jusqu'à Newton⁸ (faisant reposer les caractéristiques de l'équilibre de la balance, à tort, sur les incertitudes liées à la qualité du pivot (Renn & Damerow, 2012c)).

5. L'idée ici, est de ne pas renforcer un découpage particulier dont on sait qu'il est déjà présent.

6. Grandeur difficilement accessible empiriquement pour des raisons essentiellement biologiques (López-moliner, Maiche, & Estaún, 2003).

7. Moments, forces et pseudo-forces.

8. 1642-1727

Description mécanique du système

Du point de vue mécanique, le pendule est soumis à la force de gravité et à la réaction du pivot sur le pendule, et le chariot est soumis à la gravité et à la réaction des rails sur lesquelles il circule. Le mobile étant animé d'un mouvement de translation par rapport au sol, il s'applique sur la boule du pendule une pseudo-force égale et opposée à l'accélération du chariot (à un coefficient multiplicatif près). L'application des théorèmes généraux de la mécanique classique (voir par exemple Serway et Beichner (2000)) doivent conduire les étudiants à prendre en compte cette pseudo-force pour l'inclure dans le bilan des efforts appliqués au système et ainsi déduire le comportement du pendule et du chariot, en fonction des paramètres du mouvement (vitesse et accélération du chariot par rapport au sol et du pendule par rapport au chariot). Les conditions d'équilibre du chariot par rapport au sol et du pendule par rapport au chariot et au sol sont récapitulées dans le tableau 2.1.

TABLE 2.1 – Relations entre l'équilibre du pendule et les caractéristiques du mouvement du chariot

État du pendule	Mouvement du chariot dans le référentiel terrestre		
	Au repos $ \vec{V} = 0$	Mvt. uniforme rectiligne ($ \vec{V} = C^{te} \neq 0$)	Mvt. Uniformément accélééré ($ \vec{a} \neq 0$)
En équilibre dans le réf. terrestre	oui	oui	non
Au repos dans le réf. terrestre	oui	non	non
En équilibre dans le réf. du chariot	oui	oui	oui
Au repos dans le réf. du chariot	oui	oui	oui

2.3.3 Structure des questionnaires

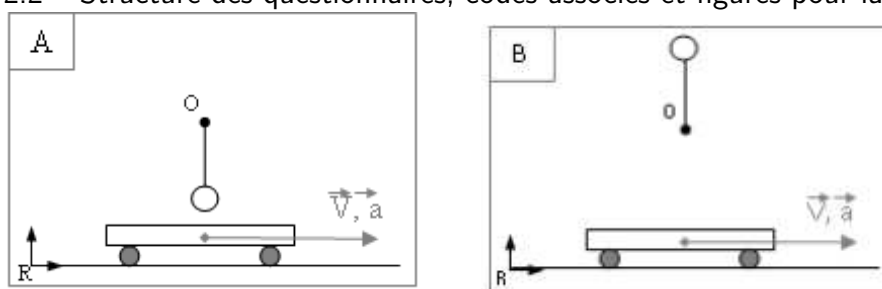
Le questionnaire se compose de deux parties.

Partie 1

La première partie du questionnaire comporte deux situations d'équilibre du système sur lesquelles les étudiants doivent se prononcer (voir figure 2.2), les caractéristiques des questions auxquelles doivent répondre les étudiants et leur référence (code) sont rassemblées dans le tableau de la même figure.

Les étudiants doivent choisir les valeurs de vitesse et d'accélération du chariot par rapport au sol – en fait, dire si elles sont constantes, nulles ou non – qui permettent d'obtenir pour chacune des configurations du système A et B un état d'équilibre pour le

TABLE 2.2 – Structure des questionnaires, codes associés et figures pour la partie 1.



Situation (référence)	État ^a d'équilibre	référentiel	Condition nécessaire ^b (relative à)	Code
A	Stable	Inertiel	Vitesse nulle	AVN
			Vitesse constante	AVC
			Accélération nulle	AAN
			Accélération constante	AAC
B	Instable	Inertiel	Vitesse nulle	BVN
			Vitesse constante	BVC
			Accélération nulle	BAN
			Accélération constante	BAC

^a Dans le référentiel du chariot. ^b Pour le mouvement du chariot

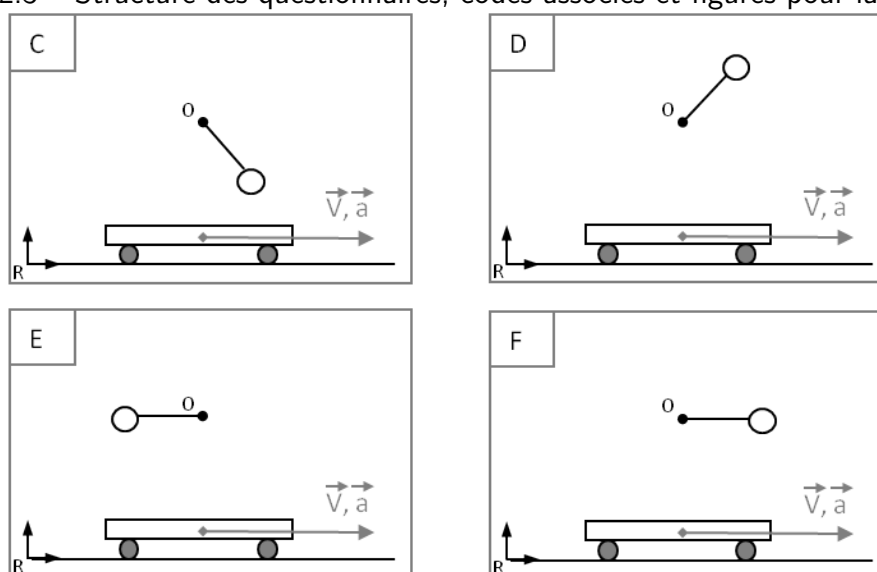
pendule. Pour cela, on leur demande s'ils sont d'accord ou non (ou s'ils ne savent pas) avec les affirmations de la colonne « condition nécessaire » du tableau de la figure 2.2.

En fait, pour les deux situations, les conditions d'équilibre du pendule et du chariot sont les mêmes, une accélération du chariot nulle par rapport au sol, ce qui entraîne une vitesse constante, nulle ou non, pour le système. Pour arriver à cette réponse les étudiants doivent par exemple appliquer correctement le critère de nullité de la somme des efforts extérieurs au système. Toute réponse différente de celle précitée pour le cas A et le cas B va donc nous renseigner sur le raisonnement utilisé par les étudiants qui est en relation directe avec la position du pendule (bas ou haut), la seule variable du système qui change entre les deux situations.

Partie 2

La seconde partie du questionnaire comporte quatre situations (voir figures 2.3) représentant le même système mais pour lesquelles on indique (dans l'énoncé) que la vitesse

TABLE 2.3 – Structure des questionnaires, codes associés et figures pour la partie 2.



Situation (référence)	État ^a d'équilibre	Référentiel	Condition nécessaire ^c (relative à)	Code
C	Non	Non-inertiel	Équilibre	CE
			Stabilité	CS
			Justification ^b	CJ
D	Instable	Non-inertiel	Équilibre	DE
			Stabilité	DS
			Justification ^b	DJ
E	Non	Non-inertiel	Équilibre	EE
			Stabilité	ES
			Justification ^b	DJ
F	Non	Non-inertiel	Équilibre	FE
			Stabilité	FS
			Justification ^b	FJ

^a Dans le référentiel du chariot. ^b En cas de non équilibre. ^c Pour le mouvement du chariot

du chariot et son accélération sont strictement **positives**⁹, dans toutes ces situations. Cette indication place la situation d'emblée dans un cas non-inertiel.

On demande alors aux étudiants, si les positions proposées sont des situations d'équilibre réalisables (réponses possibles oui/non/ne sais pas) et si elles seraient alors stables (réponses possibles oui/non/ne sais pas). On demande aussi de justifier la réponse. On

9. Ce mot est aussi surligné en gras dans l'énoncé distribué aux élèves

remarque que pour les cas E et F, les situations sont impossibles physiquement (la gravité étant non nulle) et pour les cas C et D, bien que les deux soient réalisables dans un contexte général, ici, l'accélération étant positive, le cas D doit être rejeté.

Pour répondre correctement dans ces situations, le critère de nullité de la somme des efforts extérieurs est suffisant. Cependant, on peut s'attendre à ce que la configuration du pendule sur le chariot influence là encore le raisonnement utilisé par les élèves dans le cas où ce critère ne serait pas totalement opérationnel. Ces situations doivent permettre de constater si la position du pendule vers l'avant est, par exemple, systématiquement rejetée ce qui pourrait indiquer une influence directe de la vitesse de déplacement du chariot sur le bilan des efforts alors que ce qui compte ici est plutôt l'accélération (une identification vitesse/accélération, facette 259).

2.3.4 Analyse des données

Partie 1

Pour cette première partie, une réponse correcte est donc le quadruplet {AVC, AAN, BVC, BAN} (voir le codage de chaque réponse dans la table) composé des réponses au cas A {AVC, AAN} et de celles au cas B {BVC, BAN}. Afin d'observer les changements dans le raisonnement de chaque étudiant selon la situation (A ou B), on va définir des « profils types », ou « patrons » de réponses et comptabiliser ensuite par situation le nombre d'étudiants dans chaque profil. Ci-dessous la liste des profils utilisés :

- RRA : Right Responses for situation A, correspond à AVC, AAN
- RRB : Right Responses for situation B, correspond à BVC, BAN
- RRP1 : Right Responses for whole Part 1, correspond à AVC, AAN, BVC, BAN
- ImA : Immobility for situation A
- ImB : Immobility for situation B
- CA : Consistent Answers

Certains profils prévisibles ont été définis avant le traitement des données comme les profils correspondant aux bonnes réponses pour la situation A, B ou pour les deux

situations (appelés RRA, RRB et RRP1 respectivement). Ces profils correspondent aux facettes relatives à une conception correcte de l'équilibre mécanique comme somme nulle des efforts extérieurs (impliquant une conception correcte de l'accélération du mobile). Une facette correspondant à la conception de l'équilibre seulement en cas d'immobilité du système (vitesse du chariot nulle par rapport au sol) est aussi prévisible et associée aux profils ImA, ImB. Elle est liée aux difficultés des étudiants, répertoriées dans la littérature, pour concevoir l'équilibre mécanique dans le cas des mouvements rectilignes et uniformes. Afin de déceler les incohérences dans les réponses des étudiants relativement aux stratégies qu'ils devraient utiliser pour répondre, le profil « CA » a été créé. En effet, on peut s'attendre à ce que les étudiants répondent d'une certaine façon dans la situation A s'ils utilisent un certains schéma de pensée, c'est-à-dire s'ils font appel à une certaine combinaison de *p-prims* constitutives d'une facette donnée, et qu'ils utilisent ce même raisonnement ou cette même combinaison dans la situation B (induisant donc une réponse prédéterminée). Ce profil permet de détecter l'utilisation de ce même schéma dans les deux situations ou non, permettant donc d'inférer dans ce dernier cas l'émergence de nouvelles facettes. On peut ainsi prévoir d'observer certaines facettes dans cette première partie :

- facet 0 : l'équilibre est expliqué avec la somme des forces et des moments nulle
- facet 1 : l'équilibre est expliqué avec la somme des forces nulle
- facet 8 : l'équilibre n'existe que si $v=0$
- facet 9 : l'équilibre n'existe que si le système est dans une « position naturelle »

On remarque que certaines de ces facettes peuvent être reliées à d'autres relatives au *cluster* « At rest » ou « Motion » mais la dernière par exemple est plus spécifique, on pourrait donc créer un nouveau *cluster* pour ces facettes.

Partie 2

L'utilisation conjointe de situations impliquant un référentiel non inertiel (accélération non nulle) doit permettre de détecter des influences des facettes liées aux mouvements sur celles liées à l'équilibre. De même, la question de la stabilité doit permettre de voir s'il y a des influences mutuelles des deux concepts qui nous intéressent ici dans l'esprit des étudiants. Un codage identique à celui de la partie 1 pour les questions à choix

multiple va être utilisé conjointement à un traitement spécifique des justifications des étudiants proche de celui adopté par Newcomer et Steif (2008). Il n'y a cependant pas de *cluster* relatif à la stabilité dans la littérature, nous allons donc analyser les arguments des étudiants et en dégager les éléments lexicaux qui peuvent indiquer une facette déjà répertoriée ou non. La première *facette* de ce nouveau *cluster* est celle correspondant le mieux au savoir scientifique : « La stabilité est une caractéristique de l'équilibre » (Stability is a characteristic of an equilibrium).

De plus, on peut penser que les étudiants utiliseront, pour justifier leur réponse, soit un critère énergétique comme celui de la dérivée de l'énergie potentielle, soit un critère lié à la somme des efforts extérieurs (forces et/ou moments). Le premier critère étant le plus prévisible étant donné leur cursus et le second plus complexe à manipuler (puisque ce critère ne renseigne en premier abord que sur l'équilibre et il faut alors imaginer comment cette somme est modifiée lors d'un déplacement autour de la position d'équilibre pour déduire la stabilité de cet équilibre). Une deuxième facette pourrait donc être relative à un critère énergétique : « Il y a stabilité quand l'énergie potentielle est minimum » (There is stability when potential energy is minimum). Nous allons rassembler ces éléments en deux catégories : les « arguments critères » comme l'énergie potentielle ou le bilan de force, et les éléments de réponses, partiels, comme la vitesse, l'accélération, ou le poids. Pour chaque élément (vitesse, accélération, poids, bilan, énergie potentielle), nous allons chercher et comptabiliser les cas où il est donné directement, où il ne l'est pas ou si l'on peut inférer son utilisation, et ce, pour chaque étudiant. Par exemple, pour un étudiant qui mentionne l'accélération, on va compter cet argument à la fois dans l'élément de réponses partiel, explicite, « accélération » et, si l'on peut inférer l'utilisation d'un bilan de forces dans la justification, on va le compter aussi dans l'argument critère « bilan ». Les autres arguments seront regroupés et, s'ils sont suffisamment nombreux, permettront de créer de nouvelles facettes.

2.4 Résultats

La partie 1 a été proposée à 51 étudiants français de niveau universitaire « L3 » et la partie 2 à 80 étudiants du même niveau. On considère généralement que ce type d'étudiant maîtrise ces concepts, non seulement parce qu'il les a appris mais aussi parce qu'il les mobilise dans le contexte des cours d'automatique par exemple. Il s'agit d'un public dont le niveau en physique est reconnu comme bon car issu des classes préparatoires aux

grandes écoles.

2.4.1 Partie 1

Statistiques descriptives

Dans un premier temps, on va comptabiliser les réponses brutes des élèves pour chacune des deux questions de cette partie (voir tableau 2.4 pour les situation A et B)

TABLE 2.4 – Résultats pour la partie 1, cas A & B, réponses correctes surlignées (V=vitesse, A=accélération, N=nulle, C=constante), n=51

Ans.	AVN	AVC	AAN	AAC
Oui	12 (23.5%)	44 (86.3%)	44 (86.3%)	7 (13.7%)
Non	39 (76.5%)	7 (13.7%)	7 (13.7%)	38 (74.5%)
JSP	0	0	0	6 (11.8%)
Ans.	BVN	BVC	BAN	BAC
Oui	23 (45%)	25 (49%)	32 (62.7%)	11 (21.5%)
Non	27 (53%)	25 (49%)	19 (37.3%)	38 (74.5%)
JSP	1 (2%)	1 (2%)	0	2 (4%)

Comme on peut le remarquer, le taux des réponses correctes est différent pour les deux situations et diffère aussi selon la variable physique considérée, vitesse ou accélération. Un test de χ^2 montre que la différence des résultats globaux entre les deux situations est statistiquement significative ($p = 0.0002$, test de Pearson corrigé). Comme il ne s'agit pas d'un effet du hasard, on peut donc déduire que les étudiants n'utilisent pas le même raisonnement pour traiter les deux situations et comme la seule variable qui change entre la situation A et B est la configuration du pendule, on peut avancer que c'est cette différence de configuration qui est la cause de ce changement de stratégie chez les étudiants. L'analyse des profils, va nous permettre de savoir quels sont les éléments ou les groupes d'éléments qui changent d'un cas à l'autre pour chaque étudiant.

Sur la figure 2.2, on peut remarquer que seulement 17.65% des étudiants ont répondu correctement à l'ensemble de la première partie (RRP1) et que c'est finalement la situation B (RRB) qui a posé le plus de problème, ce qui est concordant avec l'analyse statistique globale. Quant à la première situation, si elle semble avoir posé moins de problème aux étudiants, seulement 55% ont répondu correctement (voir table 2.2) et sur les 45% qui ont donné une réponse erronée, 34% ont supposé le chariot immobile

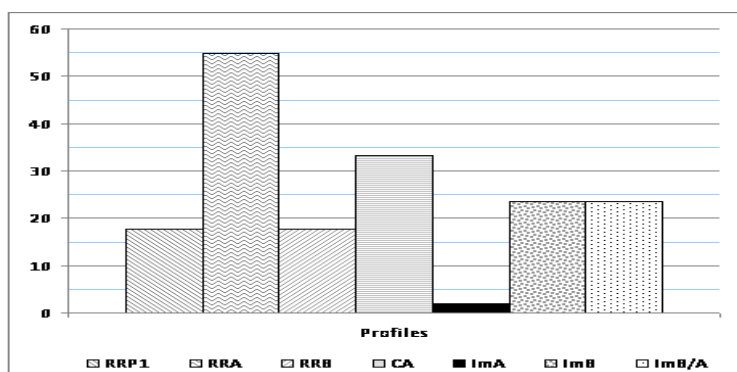


FIGURE 2.2 – Fréquences dans chaque profil pour la partie 1(en % des réponses totales)

(AVN).

Cependant l'élément supplémentaire apporté par l'analyse des profils est ici que 24% des étudiants ont changé d'avis quant à l'immobilité du chariot entre la situation A et la situation B (voir taux de ImB/A) et que seulement 33% des étudiants ont répondu de façon cohérente, c'est-à-dire ont considéré que les mêmes conditions de vitesse et d'accélération s'appliquaient aux deux cas pour justifier l'équilibre. On a donc 66% des élèves (34 sur 51) qui ont considéré que l'équilibre dans les deux cas ne pouvait pas s'expliquer par les mêmes conditions de vitesse et/ou d'accélération : ceci corrobore donc le fait que les étudiants n'ont pas utilisé les mêmes stratégies pour expliquer l'équilibre dans les deux cas.

Sur ces 34 étudiants, 53% considèrent que le chariot doit avoir une vitesse nulle dans la situation 2 pour que l'on ait équilibre du pendule, ce qui représente 35% de tous les étudiants pour lesquels on peut mettre en évidence la facette 3 (équilibre si vitesse nulle). Parmi les autres, aucun profil ne se dégage à part celui montrant l'utilisation adéquate d'un bilan de force (inféré) conduisant à une réponse correcte, soit la facette 1. On peut inférer l'influence de la stabilité du pendule sur les raisonnements des étudiants, car on sait par ailleurs que ce public possède une connaissance, au moins déclarative, des conditions de stabilité du pendule : la position d'équilibre basse est une position d'équilibre stable et la position verticale haute est instable.

2.4.2 Partie 2

Dans cette partie, la question posée aux élèves faisant directement référence au concept de stabilité, on doit obtenir des éléments plus précis sur les liens qu'entretiennent

stabilité et équilibre dans l'esprit des élèves. Dans le tableau 2.5 on peut remarquer que le taux de réponses à l'item « S » (stabilité) est supérieur à celui des réponses « Oui » pour l'item « E » (équilibre) de la situation correspondante. Ceci, pour 43 étudiants sur 80 dans la situation C, 44 dans la D, 13 dans la E¹⁰ et 35 dans la F. Pour ces étudiants, le pendule pourrait donc être stable et en même temps ne pas être en équilibre. Ces données indiquent que pour presque la moitié des étudiants interrogés, la stabilité n'est pas perçue comme une caractéristique de l'équilibre mais pourrait en être indépendante, ce qui est inattendu et nous fournit une nouvelle facette pour le *cluster* « stability » : « stability is independent of equilibrium ».

En ce qui concerne l'équilibre seul, on peut remarquer que le taux de réponse « non » à l'équilibre des situations C et D est similaire alors que la seconde est une position d'équilibre réaliste et la première non. On peut donc inférer que les étudiants ont utilisé un autre raisonnement que celui impliquant le bilan des efforts extérieurs au système.

D'autre part dans la situation D, l'équilibre supérieur est majoritairement considéré comme impossible (à 72%) ce qui est cohérent avec le résultat de la première partie : la position d'équilibre supérieure ne semble pas « résister » à un déplacement du chariot, qu'il soit uniforme ou uniformément accéléré. Cet élément conduirait à identifier une facette supplémentaire pour l'équilibre instable dans le cas où la vitesse est non nulle : « il y a équilibre instable seulement si $v=0$ ».

Finalement, on peut remarquer que les taux de réponses « Oui » et « Non » pour l'équilibre des situations E et F sont quasiment opposés, comme les positions du pendule. Ceci suggère là encore que le sens de déplacement du système, sa vitesse plus que son accélération, semble jouer un rôle important dans le raisonnement utilisé par les étudiants et entraîne un traitement « non symétrique » des situations.

TABLE 2.5 – Résultats bruts de la partie 2, cas C,D,E et F, réponses correctes surlignées (E = équilibre réaliste, S = stabilité)

	CE	CS	DE	DS	EE	ES	FE	FS
Oui	18(22.58%)	11(17.46%)	21(26.25%)	5(7.25%)	61(76.25%)	45(62.50%)	26(32.50%)	12(18.46%)
Non	62(77.5%)	49(77.78%)	58(72.50%)	61(88.41%)	19(23.75%)	25(34.72%)	51(63.75%)	50(76.92%)
JSP	0	3(4.76%)	1(1.25%)	3(4.35%)	0	2(2.78%)	3(3.75%)	3(4.62%)
TOTAL	80	63	80	69	80	72	80	65

10. Ce chiffre plus faible que les autres s'explique par le fait que cette situation est apparue majoritairement en équilibre pour les étudiants, il y a donc eu beaucoup moins de réponses « Non » qu'aux autres

TABLE 2.6 – Arguments utilisés pour la partie 2 : nombre d'argument et pourcentage des arguments utilisés

Cas	Vit.	Acc.	Poids	Bilan	PE	Tot. Arg.
C	22(27.5)%	12(15%)	4(5%)	4(5%)	0	42
D	9(11%)	6(7.5%)	10(12.5%)	5(6.2%)	2(2.5%)	32
E	20(25%)	17(21%)	10(12.5 %)	14(17.5%)	0	61
F	13(16%)	9(11%)	12(15%)	12(15%)	0	46

La table 2.6 récapitule le nombre des arguments utilisés par les étudiants pour justifier leurs réponses. Les arguments du type énergétique sont marginaux et ceux relatifs à l'application d'un bilan de force paraissent plus utilisés mais en fait, seuls **trois** étudiants l'ont appliqué de manière adéquate à toutes les situations, ce qui leur a permis de répondre correctement à cette partie.

En affectant des poids aux différents arguments selon qu'ils sont proches ou non du raisonnement (ou facette) correct pour la situation (-2 pour un argument de type vitesse, -1 pour un argument de type vitesse implicite, 0 pour l'absence d'argument, 1 pour un bilan de force implicite et 2 pour un bilan de force explicite ou l'énergie potentielle) on peut chercher des corrélations entre les situations et le type d'argument utilisé. Ce codage est en adéquation avec notre but qui est de vérifier la présence ou non d'arguments relatifs à certaines conceptions et si ces arguments sont proches ou non d'une conception « correcte »¹¹. Globalement, on observe un lien significatif entre les situations et les arguments utilisés (avec un test du χ^2 : $p = 0,003$). Plus précisément, un test de Wilcoxon apparié révèle une différence significative entre les situations C et D ($p = 0,002$). On peut donc regrouper les situations selon le type d'argument utilisé ce qui nous donne deux partitions possibles :

1. {C,E} et {D,F} si l'on considère les arguments relatifs au déplacement du chariot (essentiellement celui de la vitesse)
2. {C,D} et {E,F} si l'on considère l'utilisation d'un argument-critère.

Si l'on rapproche ces groupes des aspects saillants des situations, dans le deuxième groupement, on peut avancer que la position horizontale du pendule va impliquer plus fréquemment l'utilisation d'un bilan de force, ce qui est une stratégie efficace dans tous les cas, mais sans pour autant amener les étudiants à la réponse correcte, sans doute

11. Au sens de « proche du savoir scientifiquement admis ».

du fait d'une défaillance dans l'application de sa conclusion (par exemple « il faut une accélération très importante, ça ne peut donc pas durer » ou « si il y a une accélération suffisamment grande », et.). On peut y voir une manifestation de la facette « équilibre = position horizontale » qui dans ce cas amènerait les étudiants à utiliser le critère majoritairement vu pour traiter l'équilibre de la balance mais sans comprendre exactement ce que cela implique, notamment le fait que quelque soit la valeur de l'accélération, la somme vectorielle des efforts ne peut être nulle.

Finalement, si l'on regarde dans quels cas ont été utilisés tels ou tels arguments, on remarque que l'on peut former un groupe avec les situations C, D et F. Pour ces situations, il y a, en effet, une corrélation statistiquement significative entre la direction du pendule et l'utilisation du critère « vitesse » pour réfuter l'équilibre (χ^2 -test, $p = 0,0009$). Si l'on rapproche cela du deuxième groupement précédent, on peut y voir une manifestation de la facettes "équilibre = position naturelle" (et de sa négation/généralisation : "pas d'équilibre car pas dans une position naturelle"), et les arguments de certains étudiants y font référence relativement directement : « logique d'après le sens du mouvement » ou « du mauvais côté ».

Les différences entre les réponses à ces six situations mettent en évidence plusieurs difficultés chez les élèves quant aux concepts d'équilibre et de stabilité. D'une part, il semble que le lien entre ces deux concepts ne soit pas « unifié » : alors que du point de vue physique, la stabilité est une caractéristique de l'équilibre, chez la moitié des étudiants, elle semble comme déconnectée de ce second concept. D'autre part, les élèves ont du mal à penser la position d'équilibre instable comme étant produite par les mêmes conditions que la position stable. Ils combinent difficilement les notions d'équilibre avec le déplacement du système étudié. Il semble qu'au-delà de l'équilibre, ils fassent une distinction entre les conditions qui donnent naissance à une position d'équilibre stable et celles qui donnent une position instable. Les étudiants semblent utiliser des « stratégies explicatives » dépendant de la configuration du système, parfois ces stratégies sont adéquates (par exemple l'application d'un bilan de force) d'autres fois elles sont issues de règles empiriques (influence de la vitesse par exemple). Ceci conduit à une certaine dissymétrie dans la compréhension du concept d'équilibre au détriment de la position d'équilibre instable. On constate qu'en cas d'entraînement, c'est cet équilibre tout entier qui disparaît. Comme si la stabilité était vue comme une qualité qui permettrait à l'équilibre de rester « équilibre » face aux perturbations (déplacements) extérieures plutôt que comme une caractéristique supplémentaire de cet état du système.

2.5 Conclusion

Les étudiants concernés par cette étude ne devraient pas avoir de problème avec ces concepts étant donné que l'enseignement qu'ils ont suivi les a amené à les étudier de façon théorique mais aussi pratique au moins dans le cadre de la mécanique classique. De plus, l'échantillon choisi était constitué d'étudiants qui avaient suivi un cours complet d'automatique, champ de l'ingénierie qui s'intéresse à l'analyse et à la commande des systèmes (dynamiques en général). Dans cette discipline, ces concepts sont fondamentaux et un des buts de l'automaticien est justement de chercher des points d'équilibre pour des systèmes et si possible de rendre stable, en ces points, un système naturellement instable, par exemple.

Le système choisi dans cette étude est tout-à-fait emblématique : le pendule sur un chariot est un système très utilisé car mobilisant plusieurs aspects importants de la commande des systèmes : c'est un système du second ordre possédant deux points d'équilibre, un stable (position verticale inférieure et vitesse de rotation nulle) et un autre instable (position verticale supérieure et vitesse de rotation nulle). Par le biais d'un système de régulation adéquat, on cherche généralement à stabiliser le pendule en position verticale haute en commandant les déplacements du chariot, ce qui donne matière à utiliser tous les outils mathématiques disponibles dans la trousse à outils de l'automaticien : modélisation du système, recherche des états d'équilibre, linéarisation, commande par retour d'état ou autre, etc.

L'étude du pendule ou d'autres systèmes « simples » du point de vue mécanique étant considéré comme acquis à ce niveau, on se focalise généralement sur la mise en équation – différentielles – du système et l'étude mathématique de ses propriétés¹². L'équilibre et la stabilité sont donc souvent abordés d'un point de vue essentiellement mathématique, au travers de l'application de critères algébriques (calcul de racines de polynômes, de valeurs propres de matrices, etc.) ou graphiques (lieu des pôles, critère du revers, etc.). Ces concepts apparaissent presque comme des savoirs nouveaux pour les étudiants de notre échantillon qui les ont pourtant rencontrés au moins deux fois au cours de leur scolarité immédiate (au lycée et en première année d'école d'ingénieur, en physique). On peut considérer que le lien entre ce qu'ils ont vu de ces concepts en mécanique

12. On pourrait ajouter que la mise en équation du système vise essentiellement à passer à d'autres représentations – fonction de transfert ou modèle d'état – ce qui en général ne sous-entend pas que l'on s'attarde sur la compréhension ou la signification de l'équilibre et/ou de la stabilité à ce niveau. Sans doute parce qu'on imagine que cela est acquis.

Newtonienne et le fond mathématique présenté en Automatique n'est pas fait. Et pour cause, leur connaissance de ces concepts du point de vue mécanique n'est que peu opérationnelle et parfois même très éloignée du savoir scientifique. Ceci ne va pas sans poser de problème et lors de l'étude de systèmes électromécaniques complexes, réels, comme celui d'un véhicule électrique inclinable (Rajamani, 2006), pour lesquels il est nécessaire d'avoir bien compris le fonctionnement – au sens *comportement* – du système avant de le mettre en équation, on voit surgir des difficultés provenant de cette incompréhension¹³. L'équilibre et la stabilité de systèmes non mécaniques sont aussi abordés dans la scolarité antérieure de ces étudiants, en chimie ou en éducation physique, en France comme dans les pays anglo-saxons, et on peut supposer que ces points de vue, ces approches différentes de ces mêmes concepts aient un impact sur la compréhension, sur la construction de leurs conceptions de ces concepts. D'autant plus qu'il n'est jamais fait de rapprochement « académique » entre ces différentes approches. On peut donc imaginer qu'un enseignement cohérent et fédérateur de ces concepts faisant appel à des exemples piochés dans plusieurs domaines puisse être un élément de réponse pour améliorer la compréhension des étudiants sur ce sujet. Nous allons tenter dans la suite de cette étude de concevoir une séquence de classe visant cette vision fédératrice de l'équilibre (et de la stabilité).

13. Il s'agit par exemple de difficultés à considérer la cabine du système dans une position d'équilibre inclinée lorsque le véhicule roule en virage et qu'il y a donc présente d'une accélération latérale non nulle.

Les connaissances des étudiants ingénieurs à propos de l'équilibre et de la stabilité

3.1 Introduction

La « cible » de nos travaux est principalement composée des étudiants des cursus d'ingénierie des universités et des écoles d'ingénieurs. Ces étudiants viennent généralement (et par ordre d'importance) des classes préparatoires aux grandes écoles (CPGE, 60 % des entrants au niveau L3), des filières techniques (BTS (7 %) ou IUT (18 %)) et des préparations intégrées ou licences universitaires (6 %) pour le cas Français (CGE, 2012) et des *Bachilleratos* pour ce qui concerne la Colombie.

Une des questions posées par les difficultés décelées chez ces étudiants dans le premier chapitre concerne le degré d'acquisition de leurs connaissances académiques relativement aux concepts qui nous intéressent ici, développées dans les cursus antérieurs, et qui doivent leur permettre de résoudre des problèmes d'équilibre et de stabilité. Lors de cette première étude nous avons fait la même hypothèse que celle qui est faite à l'entrée des cours d'automatique : que ces élèves ont acquis les connaissances (lois, théorèmes, etc.) des niveaux inférieurs. Cependant, certains indices relevés, nous permettent de douter de la valeur de ces acquisitions ou, à tout le moins, de leur caractère opérationnel. Nous nous proposons donc de vérifier cette hypothèse en premier lieu. Afin de mesurer ces acquis, nous avons développé un outil d'évaluation de type questionnaire. Il vise à répondre à plusieurs interrogations concernant à la fois la teneur et la *qualité* de ces connaissances, et, plus particulièrement : les élèves connaissent-ils les contenus, définitions et procédures liés aux concepts qui nous intéressent ? Sont-ils bien en capacité d'utiliser ces connaissances pour résoudre un problème simple lorsqu'ils les possèdent ? Pour cette seconde étude, nous allons réutiliser le même type de système que dans la

première mais nous allons chercher un autre cadre théorique, mieux adapté que celui des *facettes* pour répondre à ces questions et différencier, dans les réponses des étudiants, ce qu'ils *savent* de ce qu'ils *savent en faire*.

D'après les travaux de Herl et al. (1999) on peut dire que, de manière générale, pour résoudre un problème, il faut savoir quelque chose (le contenu), posséder des « trucs intellectuels » (les procédures), être capable de « monitorer »¹ sa progression dans la résolution du problème et avoir la motivation pour le résoudre. Si l'on met de côté les aspects liés à la motivation, on peut préciser les choses en se référant à l'approche d'Anderson (1982) et regrouper les connaissances nécessaires à la résolution d'un problème en trois grands groupes : celui des connaissances factuelles (déclaratives), de raisonnement (procédurales) et de régulation (métacognitives ou stratégiques) qui seraient toutes complémentaires. Du point de vue de l'évaluation, Solaz-Portolés et López (2003); Ruiz-Primo et Shavelson (1996); Shavelson (1974) ont proposé de décomposer les connaissances d'un individu en 4 « types », toujours dans une optique de résolution de problème :

- Les connaissances déclaratives
 - Les connaissances procédurales
 - Les connaissances schématiques
 - Les connaissances stratégiques
- Les *connaissances déclaratives* englobent toute les connaissances que l'individu peut énoncer (déclarer) et que l'on peut schématiquement relier au contenu de la mémoire déclarative (Gazanniga, Ivry, & George R. Mangun, 2008) comme les dates, les noms, etc. Solaz-Portolés et López (2003) parlent de « savoir que »², ce qui inclut les faits, définitions et descriptions, dont le contenu est majoritairement spécifique à un domaine. Dans notre cas, c'est par exemple la connaissance des théorèmes généraux de la mécanique classique, des lois de Newton, la définition des critères d'équilibre et de stabilité, etc.
 - Les *connaissances procédurales* concernent toutes les connaissances liées aux procédures de calcul par exemple, qui en général sont réparties entre la mémoire déclarative et

1. Suivre et évaluer l'écart par rapport au but à atteindre. Cela fait partie de ce que l'on appelle la *métacognition*.

2. « Knowing that ».

procédurale (Schacter, 1987). Solaz-Portolés et López (2003) parlent de « savoir comment »³ ; il s'agit de la production de règles et de procédures pour résoudre un problème. Dans un contexte *mécanique*, ce peut être par exemple la procédure de formation des sommes vectorielles de forces et de moments (calcul vectoriel).

- Les *connaissances schématiques* concernent la connaissance des principes généraux et des schémas, c'est le « savoir pourquoi »⁴ de Solaz-Portolés et López (2003). On peut y ranger la connaissance des limites d'application des lois et critères par exemple ou les raisons de leur application. Dans le cas de l'étude de l'équilibre en mécanique classique, il s'agirait par exemple de savoir que ce qui compte est l'accélération du corps considéré (après avoir défini les référentiels adéquats et le système formé de ce corps) qui est égale à la somme vectorielle des efforts extérieurs, et que par exemple, dans le cas d'un solide en rotation, seuls comptent les moments des forces.

- Viennent finalement les *connaissances stratégiques* qui concernent l'application de toutes les autres connaissances, il s'agit de savoir quand, où et comment appliquer ces connaissances, développer des stratégies de résolution et des heuristiques reliées au domaine. On pourrait rapprocher ce type de connaissances de ce que les auteurs francophones qualifient de *compétences* (Roegiers, 2001 ; Scallon, 2004), c'est-à-dire la capacité à mobiliser un ensemble de savoirs de manière coordonnée dans une classe de situations nouvelles et complexes.

Il apparaît possible de rapprocher ce découpage de la terminologie de la Théorie des Champs Conceptuels (Vergnaud, Halbwachs, & Rouchier, 1978) qui propose un cadre de modélisation des comportements des étudiants en situation (en action) : dans ce cas, on peut regrouper les connaissances déclaratives et procédurales dans la forme *prédicative* de la connaissance et les savoirs schématiques et stratégiques dans sa forme *opératoire*.

D'autres auteurs comme de Jong et Ferguson-Hessler (1996) ont proposé un découpage un peu plus fin des connaissances nécessaires, basé lui aussi sur une approche de « connaissances-en-action »⁵ mais en distinguant les *types* de connaissances (« situationnelles », déclaratives, procédurales et stratégiques) et des *qualités* associées à ces connaissances en termes d'organisation hiérarchique, de structure interne, de niveau d'automatisation et de niveau d'abstraction.

3. « Knowing how ».

4. « Knowing why ».

5. Knowledge-in-use

Si l'on se place du point de vue des difficultés des étudiants pour résoudre un problème, certains auteurs comme Kempa (1991) ont proposé qu'elles pouvaient être attribuées à un ou plusieurs de facteurs liés à leur *structure cognitive*⁶ :

1. L'absence d'éléments de savoir dans la structure cognitive.
2. L'existence, dans la structure cognitive, de mauvais liens ou de liens inappropriés (ou relations) entre les éléments de savoir.
3. L'absence de liens essentiels entre les éléments de la structure cognitive.
4. La présence d'éléments erronés ou inappropriés dans la structure cognitive.

Nous examinerons plus en détail l'aspect lié à ces structures cognitives dans la partie dédiée à l'ingénierie didactique que nous avons mis en place. Ce qui va être évalué dans le test proposé ci-après est plutôt du domaine des contenus (partie déclarative et procédurale) et de ce que les élèves sont capables de faire de ces contenus pour répondre à une question simple plutôt que pour résoudre un problème complet. Néanmoins, on peut considérer que le fait de prédire l'évolution d'un système (ce qui est en jeu dans la première partie du questionnaire) ne fait pas seulement appel aux seuls savoirs déclaratifs et procéduraux, s'agissant de situations nouvelles pour lesquelles il y a finalement à sélectionner les savoirs pertinents pour cette classe de situations, et à les mettre en œuvre selon une démarche non précisée, ce qui implique l'utilisation de savoirs schématiques.

On considère généralement que l'enseignement « classique » favorise l'acquisition de connaissances essentiellement déclaratives et procédurales car les évaluations traditionnellement proposées aux étudiants visent à évaluer en priorité ces connaissances. D'ailleurs, certains auteurs comme Shavelson, Ruiz-Primo, et Wiley (2005) considèrent que pour mesurer les connaissances schématiques, des tests multiples sont nécessaires (qui réclament un temps de mise en œuvre important, souvent difficile à trouver en classe) et que les connaissances stratégiques elles, sont rarement évaluées directement. D'une part, il est clair que le manque de connaissances déclaratives ou procédurales relativement au sujet proposé va conduire à l'incapacité de résoudre les problèmes qui font appel à ces connaissances mais d'autre part, le fait de posséder ces connaissances ne suffit pas à garantir la réussite à une tâche de résolution de problème y faisant appel comme l'ont noté Solaz-portolés et López Sanjosé (2008). Ces auteurs ont, de plus,

6. Ici, cela fait essentiellement référence à la structure de leur mémoire à long-terme.

trouvé un lien prédictif entre les connaissances conceptuelles (concepts et structures propositionnelles) requises et les performances de résolution de problèmes (Solaz-portolés & López Sanjosé, 2008).

Nous allons donc rechercher d'abord ces types de connaissances chez nos étudiants pour ensuite étudier comment ils les mobilisent pour répondre à des questions simples (mais qui peuvent s'apparenter à une résolution de problème lorsque la démarche pour répondre à la question fait appel à plusieurs connaissances non annoncées à l'avance qu'il faut combiner ensemble).

3.2 Présentation du questionnaire

Un questionnaire spécifiquement adapté au recueil de données relatives à ces différents types de connaissances a été conçu et proposé aux étudiants d'une école d'ingénieur au niveau L3. Il avait pour but le questionnement des connaissances déclaratives, procédurales et schématiques. L'objectif était de savoir si les étudiants que l'on considère comme « performants »⁷ maîtrisent ces concepts dans des situations éloignées et proches des situations académiques qu'ils ont pu rencontrer.

Nous avons créé un questionnaire formé de trois parties : la première partie favorise le recours aux connaissances schématiques et concerne donc des situations relativement éloignées des « standards » académiques, la deuxième permet de vérifier les connaissances procédurales dans une situation « presque classique » et la dernière est focalisée sur les connaissances purement déclaratives (les questionnaires créés sont présents en annexe, page 221).

3.2.1 Partie « schématique » (Q1)

Cette première partie était basée sur l'étude d'un système mécanique simple possédant les caractéristiques d'un dispositif didactique⁸ que l'on rencontre communément dans les laboratoires d'automatique : le pendule inversé sur un chariot. Ce système (le

7. Car issus d'un processus de sélection drastique à l'entrée et à la sortie des classes préparatoires aux grandes écoles, voir (DEPP, 2008).

8. Ici, comprendre « à visée d'enseignement ».

pendule) possède une seule position d'équilibre⁹, instable, que le chariot¹⁰ soit au repos, animé d'un mouvement rectiligne et uniforme ou uniformément accéléré par rapport au sol¹¹ (pour une description mécanique plus précise de ce dispositif, voir le paragraphe 2.3.2 et le chapitre précédent pour une analyse des connaissances déclaratives et procédurales nécessaires aux étudiants pour étudier ce système).

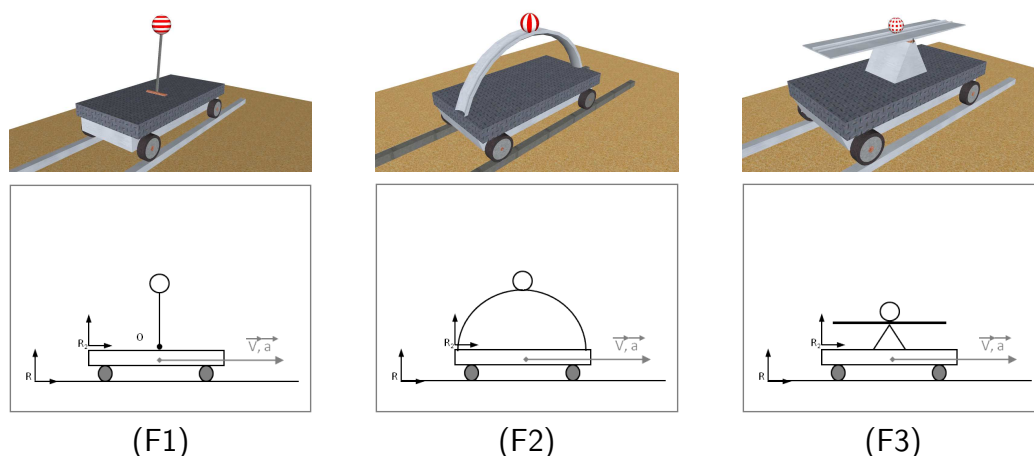


FIGURE 3.1 – Systèmes de la première partie dans les variantes F1, F2 et F3

Afin d'étudier l'influence de la « forme » du dispositif, ou des « aspects de surface » sur l'analyse conduite par les étudiants, nous avons proposé trois variantes différentes de celui-ci dans leur forme mais régis par les mêmes équations¹² (*i.e.* leur comportement dynamique est donc le même) : un pendule inversé, une bille sur un arc de cercle et un plateau pivotant (voir figures 3.1). Pour ce dernier cas, il était précisé que le plateau pouvait s'orienter comme on le souhaitait à l'aide d'un moteur, ceci ayant pour but justement de conserver une certaine inclinaison du plateau même en présence d'une accélération du chariot¹³.

Un tableau (tableau 3.1) était ensuite proposé afin de répondre à la question :

« Identifiez toutes les combinaisons de V et a qui permettent d'obtenir des situations où le système est, selon vous, dans un état d'équilibre dans R_2 en cochant les cases du

9. Le pendule a en fait deux autres positions d'équilibre stable lorsque la masse repose sur le chariot, le pendule étant alors presque horizontal. On les considère généralement plutôt comme des états limites, les équations linéaires étant obtenues seulement pour de petits angles autour de la position d'équilibre haute.

10. Auquel est attaché un référentiel nommé R_2 .

11. Noté R dans les schémas présentés sur la figure 3.1.

12. Ces équations sont présentées en annexe pour le cas du penduleB.2.

13. Ce système est relativement répandu dans sa version statique mais le principe général reste celui du plateau du « garçon de café ».

tableau ci-dessous (une situation par colonne). Schématisez ensuite approximativement la position du pendule correspondante et entourez la bonne réponse au sujet de la stabilité : ».

		Situations						
		1	2	3	4	5	6	7
V	$C^{te} = 0$	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	$C^{te} \neq 0$	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	va-riable	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
a	$C^{te} = 0$	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	$C^{te} \neq 0$	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Schéma de la position du système								
Sys. stable ?		oui/non	oui/non	oui/non	oui/non	oui/non	oui/non	oui/non




TABLE 3.1 – Tableau de réponse pour la première question

Pour éliminer un « effet de présentation » relatif à l'ordre entre les lignes « vitesse » et « accélération » du tableau, nous avons proposé deux variantes de ce questionnaire : une avec la ligne « vitesse » en premier (référéncé « a » dans la suite) et un autre avec la ligne « accélération » en premier (référéncé « b »). En effet, on pouvait penser que, d'une part comme le raisonnement attendu faisant appel à l'accélération et que d'autre part la vitesse est un facteur important dans le raisonnement des étudiants (cf. chapitre 1), si l'on présentait la ligne relative à l'accélération avant ou après celle de la vitesse cela pouvait influencer les réponses (par exemple en agissant comme une sorte de « guidage »).

Réponses attendues

On renvoi le lecteur à la première partie, s'agissant de systèmes possédant le même comportement que celui utilisé dans la première étude. En particulier, les situations d'équilibre de la boule dans le référentiel R_2 sont celles pour lesquelles on obtient une somme vectorielle nulle des efforts appliqués à celle-ci, soit : une accélération et une vitesse nulle pour le chariot dans le référentiel (R) lié au sol (bille à la verticale du

milieu du chariot), une accélération nulle et une vitesse constante pour le chariot dans le référentiel lié au sol (bille à la verticale du milieu du chariot) ou une accélération constante pour le chariot dans le référentiel (R) lié au sol (ce dernier cas se traduisant par une pseudo-force supplémentaire dans le bilan vectoriel et donc une position non verticale de la bille qui peut conduire à identifier deux cas comme dans l'exemple du haut de la figure 3.2, selon que l'accélération est positive ou négative).

		Situations						
		1	2	3	4	5	6	7
a	$C^{te} = 0$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	$C^{te} \neq 0$	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
V	$C^{te} = 0$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	$C^{te} \neq 0$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	variable	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Schéma de la position de la bille								
Système stable?		<input checked="" type="checkbox"/> oui / <input type="checkbox"/> non	<input checked="" type="checkbox"/> oui / <input type="checkbox"/> non	<input checked="" type="checkbox"/> oui / <input type="checkbox"/> non	<input type="checkbox"/> oui / <input type="checkbox"/> non	<input type="checkbox"/> oui / <input type="checkbox"/> non	<input type="checkbox"/> oui / <input type="checkbox"/> non	<input type="checkbox"/> oui / <input type="checkbox"/> non




		Situations						
		1	2	3	4	5	6	7
a	$C^{te} = 0$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	$C^{te} \neq 0$	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
V	$C^{te} = 0$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	$C^{te} \neq 0$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	variable	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Schéma de la position du pendule								
Système stable?		<input checked="" type="checkbox"/> oui / <input type="checkbox"/> non	<input checked="" type="checkbox"/> oui / <input type="checkbox"/> non	<input checked="" type="checkbox"/> oui / <input type="checkbox"/> non	<input type="checkbox"/> oui / <input type="checkbox"/> non	<input type="checkbox"/> oui / <input type="checkbox"/> non	<input type="checkbox"/> oui / <input type="checkbox"/> non	<input type="checkbox"/> oui / <input type="checkbox"/> non

FIGURE 3.2 – Deux exemples de réponses (sans les justifications) d'étudiants pour la première question (Jimmy D., n°2, en haut et Grégoire S. H., n°104) en bas.)

3.2.2 Partie « procédurale » (Q2)

Dans cette partie les étudiants se voyaient proposer l'étude d'un système relativement classique, celui d'un solide –un cube– sur un plan incliné retenu par un fil relié à un moteur (voir figure 3.3, cette figure était accompagnée d'une description précise mentionnant les repères, les conditions de glissement, etc.).

On leur a demandé, à partir de l'examen de ce système, de répondre aux trois questions suivantes concernant son équilibre et sa stabilité :

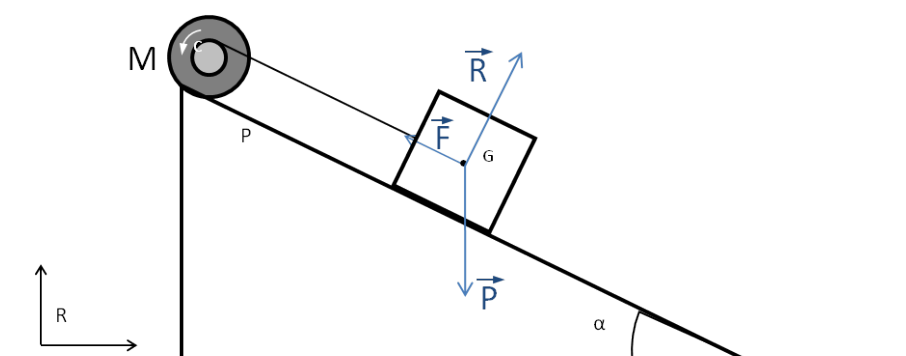


FIGURE 3.3 – Système de la seconde partie

- | | |
|--|---------|
| 1. L'accélération du cube dans R est-elle nulle ? | oui/non |
| 2. Le cube est-t-il en équilibre dans R ? | oui/non |
| 3. Le cube peut-il être en mouvement dans R ? | oui/non |

Il leur était demandé aussi de justifier brièvement chacune des réponses.

Réponses attendues

Le schéma faisait apparaître clairement les vecteurs représentant les différentes forces agissant sur le système, la description mentionnait que les longueurs de ces vecteurs, sur le schéma, étaient proportionnelles à leurs modules et aucune autre information (de type énergétique par exemple ou même les équations du mouvement) n'était fournie. Ceci favorisait donc l'utilisation de connaissances procédurales de type « pas-à-pas » ou « condition-action » (Shavelson et al., 2005) comme l'application du principe fondamental de la dynamique basé sur la formation de la somme des efforts extérieurs exercés sur le système¹⁴ (à additionner sur le schéma, ce qui donne le vecteur nul), l'identification de son accélération par rapport au référentiel lié au sol en fonction de cette somme vectorielle et la conclusion en fonction des valeurs possibles de celle-ci. Ceci impliquait donc le triplet de réponses {oui, oui, oui} : l'accélération du cube est nulle dans **R**, le cube est en équilibre dans **R** et il est donc soit au repos, soit en mouvement rectiligne et uniforme dans ce référentiel donc possiblement en mouvement.

14. À définir par l'étudiant. Ici, il s'agit du cube.

3.2.3 Partie « déclarative » (Q3)

Dans cette dernière partie du questionnaire, on demandait directement aux étudiants de « Donner un ou plusieurs critères qui permettent de dire qu'un système mécanique est en équilibre » sans plus d'indications.

Réponses attendues

Il s'agissait donc ici de donner, citer, un ou plusieurs critères, c'est-à-dire d'utiliser des connaissances déclaratives relatives à l'équilibre. Parmi les arguments corrects, on peut trouver : la somme vectorielle des efforts extérieurs appliqués au système est nulle dans un certain référentiel (galiléen), l'accélération du système est nulle dans un certain référentiel (galiléen), l'énergie potentielle du système est extrémale (minimum ou maximum), la dérivée¹⁵ de l'énergie potentielle est nulle, etc.

3.2.4 Présentation des résultats

Le questionnaire a été proposé à 103 étudiants à la fin du cours d'automatique de juillet 2012. Un nombre quasi équivalent des différentes versions de questionnaires a été administré (voir tableau 3.2).

Variante du questionnaire	Quantité distribuée
F1	35
F2	35
F3	33
a	52
b	51

TABLE 3.2 – Répartition des questionnaire

• Pour la première question, nous avons rassemblé les conditions d'équilibre de même nature avec le codage suivant :

- « NN » : accélération constante nulle, vitesse constante nulle
- « NC » : accélération constante nulle, vitesse constante non nulle
- « CV » : accélération constante non nulle, vitesse variable

15. Par rapport à une coordonnée généralisée du système et non par rapport au temps.

- « CC » : accélération constante non nulle, vitesse constante non nulle

Les trois premiers codes sont issus d'une catégorisation *a priori* qui rassemble les conditions d'équilibre correctes prévisibles. La dernière est issue de l'ajout des réponses trouvées dans les copies et, bien qu'étant absurde du point de vue mathématique (puisque l'accélération étant la dérivée de la vitesse, ce cas est impossible), regroupe un nombre faible mais non nul d'étudiants (soit un total de 18%). On peut s'interroger sur les causes d'une telle réponse et sur le sens qu'a la *dérivée*, par exemple, pour ces étudiants¹⁶.

La tableau 3.3 récapitule la collecte de ces données : au croisement de la colonne « S1 » et de la catégorie « NN » il y a 92 : il y a donc 92 élèves qui ont trouvé la combinaison « accélération nulle/vitesse nulle » (NN) comme première situation d'équilibre (S1) et si l'on suit la ligne, on remarque que 5 étudiants l'ont trouvé comme deuxième situation (S2). Si l'on regarde le total de la ligne, on peut voir que presque tous les étudiants ont considéré que cette combinaison accélération/vitesse était une condition d'équilibre pour le système ce qui était prévisible et fait état de la bonne compréhension du principe général de fonctionnement d'une partie du système. Ceci est appuyé par les chiffres récapitulant les situations d'équilibre identifiées en fonction du système : pour la condition « NN », 94 % des élèves l'ont trouvé pour le système 1, 100 % pour le système 2 et 97 % pour le système 3 (voir table 3.4).

Remarque : Le pourcentage supérieur à 100 dans la colonne « Total » du tableau 3.3 indique que certains étudiants ont fait au moins deux cas avec cette combinaison en considérant que si la tige du pendule par exemple reposait sur le côté, c'était un cas d'équilibre, ce qui est correct (voir figure 3.4). La colonne « Total réel » donne seulement le pourcentage d'étudiants ayant identifié *au moins* une de ces situations.

On retrouve les résultats de la première partie et en particulier que les situations d'équilibre possibles lors d'un mouvement sont moins bien identifiées (72 % des situations dans le cas d'un mouvement uniforme et seulement 54 % dans le cas d'un mouvement uniformément accéléré) et que cela dépend peu de la forme générale du système (42 % des situations identifiées pour l'arc, 58 % pour le plateau et 62 % pour le pendule en cas d'accélération du chariot, différence cependant non statistiquement significative, $p =$

16. On peut supputer, ici encore, un effet de contexte, qui pour certains élèves, ferait disparaître le lien entre une variable et sa dérivée. Cela réclamerait cependant davantage d'investigations.

CHAPITRE 3

		Situations						
		1	2	3	4	5	6	7
a	$C^{te} = 0$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	$C^{te} \neq 0$	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
V	$C^{te} = 0$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	$C^{te} \neq 0$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	variable	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Schéma de la position du pendule								
Système stable ?		oui/non	oui/non	oui/non	oui/non	oui/non	oui/non	oui/non

Justifiez brièvement (vous pouvez dessiner sur la figure si vous le souhaitez) ou précisez votre point de vue si nécessaire :



FIGURE 3.4 – Un exemple avec la justification (Vincent J., n°59)

Équilibre	S1	S2	S3	S4	S5	S6	Total	Total %	Total réel
Nb "NN"	92	5	6	1	0	0	104	100,97	97 %
Nb "NC"	6	58	9	2	0	0	75	72,8	69 %
Nb "CV"	3	14	29	5	5	0	56	54,4	49 %
Nb "CC"	0	7	6	5	0	1	19	18,4	
Stabilité	47	36	23	9	4	0			

TABLE 3.3 – Question 1 : nombres de situations identifiées

Équilibre	NN	NC	CV
Système 1 (pendule)	94 %	69 %	54 %
Système 2 (arc)	100 %	66 %	40 %
Système 3 (plateau)	97 %	73 %	52 %

TABLE 3.4 – Question 1 : situations identifiées vs systèmes

0,37, test du χ^2). On rappelle ici que la seule application d'un bilan des efforts extérieurs sur le système permet d'arriver à la même conclusion pour n'importe lequel des trois systèmes, ce qui suggère que, soit les étudiants ne possèdent pas cette connaissance procédural (ce qui sera recherché dans les deux autres questions), soit ils la possèdent mais ne savent pas l'exploiter.

Concernant la stabilité, la table 3.5 montre les pourcentages d'élèves qui considèrent le système stable lorsqu'il est en équilibre¹⁷ (les élèves qui considèrent la stabilité en dehors d'un cas d'équilibre ne sont donc pas comptés) en fonction du type de système. On remarque que la bille sur le plateau apparaît comme un système plutôt plus stable que les autres (15 points d'écart) dans le cas statique, ce qui était prévisible en considérant son apparence proche de la balance, et que dans le cas « accéléré » c'est le contraire qui se produit (avec un écart important pour le système 3 en cas d'accélération, ce qui peut laisser penser que les étudiants n'ont pas bien compris que le plateau pouvait être orienté dans le sens voulu justement pour conserver l'équilibre de la bille).

Stabilité	NN	NC	CV
Système 1 (pendule)	42 %	58 %	47 %
Système 2 (arc)	45 %	48 %	21 %
Système 3 (plateau)	59 %	50 %	6 %

TABLE 3.5 – Question 1 : stabilité Vs systèmes

- Pour la deuxième question nous avons compté les réponses correctes aux trois questions et pour la justification, regroupé les réponses en fonction des arguments donnés par les étudiants (« Somme des forces nulles » ou « les forces se compensent », « Somme des moments nulle », « Mouvement rectiligne et uniforme », etc.).

La table 3.6 récapitule ces résultats : nous avons présenté les pourcentages de réponses correctes par rapport aux réponses fournies et non par rapport au nombre total de questionnaires. Les trois premières colonnes donnent les quantités de réponse « oui/non », les trois suivantes, les justifications correspondantes et enfin la colonne « Q2 » indique le nombre de réponses correctes aux trois questions (sans compter la justification), .

Réponses	Q2.1	Q2.2	Q2.3	Q2.1J	Q2.2J	Q2.3J	Q2
Correctes	75 %	66 %	86 %	46 %	44 %	19 %	7 %
Incorrectes	25 %	34 %	14 %	60 %	56 %	81 %	93 %
Nulles	2	3	4	14	24	28	0

TABLE 3.6 – Question 2 : Réponses et justifications (pourcentage des réponses non nulles données et nombre)

17. Ce qui est erroné dans le cas des systèmes présentés dans la majorité des cas.

On remarque que 75 % des étudiants interrogés ont affirmé que l'accélération du cube était nulle alors que seulement 66 % pensent qu'il est en équilibre. En fait parmi ceux-ci, on dénombre seulement 55 % qui font un lien entre « accélération nulle » et « équilibre » et seulement 45 % des sondés lient correctement « accélération nulle », « équilibre » et « possibilité de mouvement du cube ».

On peut modérer les résultats en constatant que 18 % des étudiants semblent relier la vitesse du cube au couple du moteur¹⁸ ce qui bien entendu peut conduire à une réponse erronée (puisque le couple du moteur, par le biais de la tension du fil est à considérer comme un effort sur le cube et donc à relier à son accélération) mais qui n'a pas un rapport direct avec la problématique de l'équilibre.

Si l'on ne tient pas compte des justifications, 44 % des étudiants interrogés ont répondu correctement à la question 2 et si l'on tient compte à la fois des réponses et des justifications, ils ne sont plus que 7 % (c'est-à-dire 7). Des exemples de réponses correctement justifiées sont présentées sur la figure 3.5 (on note que la justification de l'étudiante qui a relié le couple et la vitesse du cube n'y est pas présentée, elle est sur la figure 3.6. Pour celle-ci, malgré l'ambiguïté des arguments donnés elle considère bien qu'un mouvement rectiligne et uniforme est un cas d'équilibre mais le fait de relier le couple à la vitesse et non à l'accélération l'empêche de considérer le cas où le cube est au repos).

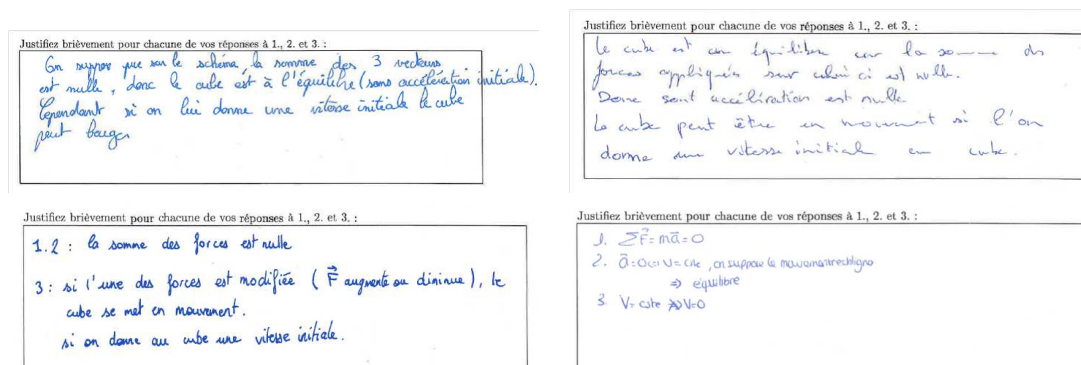


FIGURE 3.5 – Les quatre justifications correctes pour la deuxième question (Xavier M., n°74, Guillaume R., n°75, Pierre C., n°56 et Célia B., n°72), de haut en bas et de gauche à droite

- Pour la troisième question nous avons comptabilisé tous les arguments des étudiants

18. De manière très directe comme Noemie J. qui écrit : « Le couple est constant, donc la vitesse est constante. » (voir figure 3.5) ou Sophie K. : « Le couple exercé est constant donc la vitesse de déplacement est constante, [...] ».

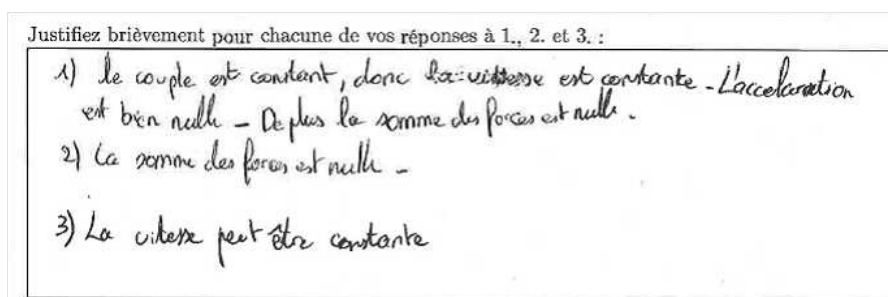


FIGURE 3.6 – Justification partiellement correcte de Noémie J., n°1

dans la table 3.7.

Réponses	Nombre	%
Correctes	64	68,8
Incorrectes	29	31,2
Somme des forces	56	60,2
Somme des moments	8	8,6
Somme complète	8	8,6
dE_p	18	19,4
dE_p nulle	6	6,5

TABLE 3.7 – Réponses à la question 3, n=103

Les critères donnés par les étudiants sont, dans leur majorité, relativement imprécis ou partiels comme « $\sum \vec{F} = \vec{0}$ »¹⁹, « accélération nulle », « $\vec{v}=\text{cste}$ et mvt translation rectiligne uniforme »²⁰ ou encore « Forces se compensent »²¹. Dans la table, on a rangé dans la catégorie *réponses correctes* tout argument correct, même partiel, les arguments comptés comme incorrectes sont par exemple « $dE_c=0$ »²² ou « E totale constante »²³, etc.

En ce qui concerne la somme des efforts extérieurs, il y a très peu de réponses strictement correctes et l'on a donc décomposé ensuite les arguments des élèves en « somme des forces », « somme des moments » et « somme complète ».

Il apparaît, dans les formulaires analysés, que tous les élèves qui ont évoqué la somme

19. Alexandra D (n°47).

20. Diane N. (n°67).

21. Morgane M. (n°49).

22. Noémie J. (n°1).

23. Sophie K. (n°17).

des moments, ont évoqué la somme des forces (il y a donc seulement deux groupes, celui avec les élèves qui connaissent le critère complet et ceux qui ne se souviennent que de la somme des forces)

En ce qui concerne les critères liés à l'énergie, nous avons compté comme correcte la réponse « dérivée de l'énergie potentielle nulle »²⁴ bien qu'étant imprécise (on ne sait pas quelle est la variable de dérivation) et incorrecte la réponse « E_p est à un extremum ($\frac{dE_p}{dt} = 0$) »²⁵ car ce n'est pas la dérivée par rapport au temps qui permet de conclure mais la dérivée par rapport à une variable du système (une *coordonnée généralisée* du système, plus précisément) comme montré sur la réponse de la figure 3.7.

Finalement, les étudiants qui donnent au moins une réponse correcte - même partielle - représentent 68 % des sondés (qui donnent une réponse).

Question 3

Soit S un système **mécanique** quelconque. Donnez un ou plusieurs critères qui permettent de dire que ce système est en équilibre :

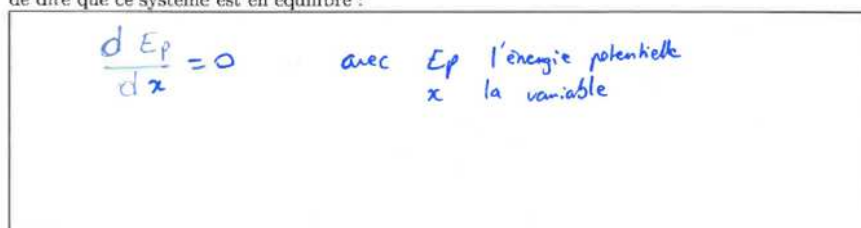


FIGURE 3.7 – Un exemple de réponse correcte relative à un critère énergétique (Jimmy D., n°2)

3.2.5 Analyse

Premièrement, on remarque que l'ordre de présentation des arguments « vitesse » et « accélération » n'a pas d'influence sur le nombre des situations d'équilibre identifié (questionnaires « a » et « b »), l'ordre d'apparition des arguments ou même le nombre de réponses « impossibles » comme le couple {Accélération non nulle, vitesse constante}. Ensuite, on constate que le nombre d'étudiants qui connaissent - ou proposent - des critères d'équilibre corrects (strictement) est plutôt faible, inférieur à 10 %, bien que presque 70 % proposent un critère « acceptable » (la somme des forces dans la majorité

24. Alexis T. (n°83).

25. Guillaume B. (n°10).

des cas²⁶) ce qui indique une connaissance approximative des lois de la mécanique classique dans ce domaine (et pas seulement au sujet des lois de Newton mais aussi en ce qui concerne les critères énergétiques).

D'autre part, les étudiants qui font les liens (corrects) entre *équilibre*, *accélération* et *mouvement* dans une situation relativement simple de mécanique des solides en translation ne représentent que 43 % des sondés et ceux qui sont en mesure de justifier correctement ces liens, à peine 5 %.

On remarque cependant que les taux de réponses correctes à la première question relativement à l'équilibre sont en moyenne de l'ordre de 97 % dans un cas statique et de l'ordre de 48 à 69 % en cas de déplacement (le plus faible taux étant constaté pour le mouvement uniformément accéléré) et ceci indépendamment de la « forme du système ». Concernant la stabilité, on constate des taux de réponses correctes proche de la moyenne quel que soit le système dans les cas statiques et uniformes et une disparité importante entre les systèmes en cas de mouvement uniformément accéléré. Finalement, les étudiants répondant correctement aux trois questions ne représentent que 12% des sondés si l'on accepte les justifications erronées et seulement 3% si l'on considère seulement les réponses exactes.

3.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons cherché à vérifier les connaissances déclaratives, procédurales et schématiques des étudiants des cursus ingénieurs relativement à l'équilibre et la stabilité en mécanique. On constate que même si les deux tiers d'entre eux connaissent des critères, définitions et procédures liées à ces concepts, à peine 10 % d'entre eux est en capacité de l'énoncer correctement. Comme cela a été montré dans des recherches antérieures (Solaz-portolés & López Sanjosé, 2008, par exemple), la possession de connaissances déclaratives est une condition nécessaire pour mener à bien une résolution de problème. On peut constater que les étudiants de notre panel, ne possédant pas ces connaissances de manière pleine et entière, ne sauraient donc être en mesure de résoudre adéquatement ce type de problème. Malgré cela, ils sont assez nombreux à conclure correctement dans le cas de la question 1 pour ce qui concerne les systèmes au repos ou en mouvement uniforme par rapport au sol ce qui laisse à penser que les connaissances testées dans les questions 2 et 3 ne sont pas les seules utilisées. Ceci est tout-à-fait cohérent avec les

26. Possiblement induites par la question précédente qui ne contient pas de rotation.

travaux précédents dans ce domaine et ceux du chapitre 1 : les aspects de surface des situations sont utilisés en priorité pour résoudre le problème posé lorsque les connaissances sont « morcelées », c'est-à-dire lorsqu'il y a un manque de structuration de ces connaissances. Ceci permet donc aux étudiants dans certains cas de réussir la tâche demandée (par exemple si la situation *ressemble* suffisamment à une situation connue) relativement indépendamment des connaissances déclaratives possédées sur le sujet mais lorsque la situation est suffisamment inhabituelle (par exemple dans les situations de mouvement accéléré), comme elle implique à la fois la mobilisation des connaissances déclaratives, procédurales et schématiques, le taux d'échec est élevé. On constate aussi que moins d'un dixième des étudiants interrogés fait des liens opérationnels entre ces connaissances déclaratives (procédures, critères et lois) leur permettant de les utiliser en situation, et ce, en fin de niveau L3 d'un cursus ingénieur généraliste.

En conclusion, une part des difficultés rencontrées par les étudiants peut être imputée à un manque de connaissances déclaratives, procédurales et schématiques. Cela les pousserait en particulier à appliquer des stratégies alternatives de résolution de problèmes comme celles identifiées dans le chapitre 1, qui sont relativement peu structurées et donc peu opérationnelles dans des situations « non standards ». On peut remarquer aussi sur cet exemple de questionnaire, que l'évaluation des connaissances déclaratives et procédurales ne donne pas d'informations sur le caractère opérationnel de celles-ci, c'est-à-dire sur les connaissances schématiques (et stratégiques), et qu'une évaluation basée sur les connaissances schématiques, comme celle proposée en premier dans le questionnaire présenté, ne permet pas d'évaluer les connaissances déclaratives et procédurales, ce qui est cohérent avec les travaux de Shavelson et al. (2005), par exemple (qui propose des méthodes d'évaluations adaptées à chaque type de connaissances).

Exploration des origines possibles des difficultés des étudiants à propos du concept d'équilibre

4.1 Introduction

On peut avancer que les difficultés rencontrées par les étudiants de notre étude, mettent en lumière certains raisonnements, certaines conceptions à propos des concepts d'équilibre et de stabilité qui se sont développées avant leur arrivée dans le cursus ingénieur. D'ailleurs, les recherches de Gunstone, Newcomer, Palmer, etc., évoquées au premier chapitre, et qui font état de raisonnements parfois proches de ceux que nous avons relevé, s'intéressent à des étudiants d'un niveau scolaire inférieur au nôtres. Nous allons donc chercher à identifier les domaines dans lesquels sont présents ces concepts et les situations de « rencontre » avec les individus qui deviendront nos futurs étudiants¹. L'équilibre et la stabilité sont des termes, des concepts, présents plusieurs disciplines, scolaires ou non, comme par exemple :

- En physique (thermique, électricité, mécanique, automatique)
- En chimie (« équilibre acido-basique » par exemple)
- En économie (« pacte de stabilité » par exemple)
- En biologie (« homéostasie » par exemple)
- En psychologie (« équilibre familial » dans les thérapies systémiques par exemple)

1. On va désigner ces individus, les « étudiants », pour plus de commodité, mais sans que cela implique un point de vue nécessairement scolaire.

- En neurosciences (nouvelles approches par les systèmes dynamiques de Van Gelder² par exemple)

Ces termes sont aussi présent dans la vie quotidienne par le biais du langage et des expériences empiriques.

D'un point de vue constructiviste (Piaget, 1936 ; Ausubel, 1969), la construction de la compréhension des concepts, est le fruit d'interactions entre le sujet et le monde réel, ce que Piaget appelle l'*expérience* (Piaget, 1931). Nous allons considérer que le monde réel dans lequel baignent les étudiants peut se décomposer en deux éléments : le milieu scolaire et le milieu extra-scolaire. Cette division³ a seulement pour but de mettre en évidence le caractère « prescriptif » que jouent les programmes scolaires dans le premier milieu et qui, dans une certaine mesure, assurent un contrôle des expériences, y compris langagières, que vivent les élèves ; le milieu extra-scolaire étant, lui, libre de ces contraintes⁴. C'est donc dans ces deux milieux que nous rechercherons des causes des difficultés rencontrées par les étudiants, en regroupant les expériences empiriques et langagières dans le milieu scolaire⁵ et en les distinguant dans le milieu extra-scolaire.

Comme on l'a vu dans le survol historique proposé en introduction, les concepts d'équilibre et de stabilité, bien que s'étant développés dans des domaines différents pendant plusieurs siècles, ont fini par atteindre un niveau très général englobant toutes les disciplines, au début du XX^e siècle. On pourrait s'attendre à ce que toutes les disciplines partagent à l'heure actuelle de manière claire les définitions de ces concepts, du point de vue de l'enseignement, et que, très tôt, l'on fasse tout aussi clairement le lien entre toutes. Il n'en est rien. Pour des raisons pas toujours explicites ou volontaires, la découverte et la définition de ces concepts dans la scolarité des élèves suit un déroulement

2. Tim Van Gelder. Voir l'ouvrage de Bermúdez (2012, p.417) pour plus de détails.

3. Division qui ne nie pas les interactions entre ces deux parties mais l'on ne va pas s'intéresser à celles-ci directement.

4. Ce milieu contient d'autres contraintes, socioéconomiques par exemple, qui peuvent limiter ou guider les expériences vécues par les élèves mais de manière indirecte.

5. On peut considérer que l'usage des termes « équilibre » et « stabilité » dans le contexte scolaire, par le professeur, est *majoritairement* conforme à la terminologie scientifiquement acceptée dans sa matière - chimie, physique, etc. Il s'agit ici d'une hypothèse que nous n'avons pas vérifiée en profondeur mais il est bien entendu clair que l'usage de ces termes, même dans le milieu scolaire, peut ne pas être toujours adéquat, surtout dans les classes de l'enseignement primaire avec des enseignants issus de filières peu ou pas scientifiques. Ces enseignants sont en effet issus du même système éducatif que nos élèves, et il ne serait donc pas étonnant que certains véhiculent les mêmes conceptions erronées. Nous avons pu constater cela auprès d'un petit panel d'enseignants de maternelle à qui nous avons demandé de se prononcer sur l'équilibre de balances de type Roberval ou Romaine dans différentes positions. Or, il leur arrive de parler d'équilibre en classe, notamment au sujet de la balance, certes de manière non formelle, mais apparemment sans en maîtriser les tenants et les aboutissants.

quasi « historique » à propos duquel on peut difficilement dire s'il est optimal ou même opportun du point de vue de la compréhension des étudiants mais en tout cas, on peut le considérer comme une source de difficultés potentielles.

En dehors de l'école, les occasions de rencontre avec les « objets-systèmes » en équilibre sont légion, par exemple dans la vie quotidienne, et si l'on adopte le point de vue à partir duquel chacun se construit ses propres représentations à partir des interactions avec son milieu de vie (Piaget, 1936, Conclusion, p.311), l'expérience, de manière consciente ou non (Sun, 1994) et généralement à partir de situations « non contrôlées »⁶, il convient de chercher à en connaître la teneur et les influences potentielles. Dans ce même milieu, les termes, mots, *équilibre* et *stabilité* sont aussi très présents, par exemple dans le langage quotidien⁷, et dans le cas où les différents sens qu'ils véhiculent ne seraient pas totalement en accord avec ceux du scientifique, on peut imaginer que cela pourrait jouer un rôle négatif (comme l'apparition d'incohérences⁸), un obstacle (Bachelard, 1934) pour la compréhension de ces concepts en milieu scolaire, qu'il serait utile de prendre en compte (ou du moins de connaître).

Nous allons donc examiner dans ce chapitre ces différentes expériences langagières, empiriques et scolaires rencontrées par les étudiants avant leurs études supérieures afin de recueillir des éléments permettant de mesurer leurs influences et leurs conséquences probables sur le développement de leur raisonnement. Cet examen sera conduit majoritairement dans un contexte français mais les aspects remarquables du contexte colombien seront aussi exposés. On peut cependant d'ores et déjà constater dans les enquêtes menées que les difficultés des élèves ingénieurs ne semblent pas très différentes d'un contexte à l'autre ou plus exactement ne semblent pas dépendre fortement des aspects culturels.

6. C'est-à-dire non soumises à un contrôle des variables de la part du sujet, sans modèle a priori, etc.

7. Qui inclut celui des informations télévisées, de la presse, les films cinématographiques, etc.

8. « Ce qui nous trompe, c'est que le même mot à la fois désigne et explique. La désignation est la même ; l'explication est différente », Gaston Bachelard, *La formation de l'esprit scientifique*, p. 21

4.2 Langage « courant » et expérience quotidienne

Les termes « équilibre » et « stabilité » sont relativement présents dans le langage courant et comme beaucoup de mots courants, ils peuvent être polysémiques (Victorri, 1996, p.5) et donc véhiculer des sens, des significations, commun(e)s, éloigné(e)s du sens accepté scientifiquement, que l'on pourrait qualifier d'approximatif, et donc potentiellement générateur d'obstacle à l'apprentissage (Ravanis, 2010). Se plaçant du point de vue du langage, on va considérer que le *sens commun* des mots est l'ensemble des significations communes⁹ de ces mots qui n'appartiennent pas au domaine scientifique et qui sont donc majoritairement utilisés dans le contexte de la vie quotidienne ou dans toute autre activité considérée comme non scientifique (et donc en particulier en dehors de l'école) pour évoquer ces concepts¹⁰. Les occasions d'interférence avec la terminologie précise de toutes les sciences dures ou humaines sont donc, bien entendu, potentiellement très nombreuses.

Les expériences quotidiennes de l'équilibre, c'est-à-dire les confrontations avec des systèmes en équilibre à partir desquelles l'esprit tire une connaissance sur ce concept, sont, là aussi potentiellement¹¹ très nombreuses et en relation étroite avec le langage (qui permet de « désigner » ces situations). D'ailleurs, les théories récentes en science cognitive, dont le *sens commun* est un objet de recherche important, définissent la *cognition naturelle* comme l'ensemble des processus et états cognitifs impliqués dans la pensée, le langage et la perception « de tous les jours » dans sa relation avec le monde et les actions manifestes du corps (elle-même pouvant être vue comme une généralisation du *langage naturel*, Smith, 1995).

4.2.1 Analyse lexicographique

Nous adoptons ici le point de vue de Georges-Elia Sarfati et considérons que « [...] le dictionnaire de langue, fait incidemment office de porte parole ainsi que de lieu d'inscription et (re)production du sens commun »¹².

De ce point de vue, nous pouvons considérer que dans une base lexicographique telle

9. C'est-à-dire partagées par le plus grand nombre dans la société.

10. On pourrait dire aussi : « L'ensemble des explications du monde partagées par le plus grand nombre, capable de générer des explications opérationnelles mais non conformes à l'explication scientifique » (de Hosson, 2005).

11. Encore faut-il les identifier correctement.

12. Mémoire d'habilitation, Sorbonne Paris-IV, 1996

que celle du CNRTL¹³, nous rencontrerons les éléments principaux du sens commun relatif aux termes qui nous intéressent ici¹⁴. Celle-ci est issue d'une compilation des sources suivantes : le Trésor de la Langue Française informatisé (TLFi), les dictionnaires de l'Académie Française (4ème, 8ème et 9ème édition), la Base de données lexicographiques panfrancophone de l'université Laval de Québec, la Base Historique du Vocabulaire Français du laboratoire ATILF, le Dictionnaire du Moyen Français (1330 - 1500) du laboratoire ATILF, et le Du Cange (Moyen Âge) de l'École Nationale des Chartes (des éléments d'étymologie et de proxémie tirée de cet organisme ont aussi été utilisés).

Les différents sens des termes « équilibre » et « stabilité » sont présentés en annexe A.1 (en page 191 et 198). Dans les (nombreuses) définitions qui y figurent, des passages ont été soulignés en couleur pour mettre en évidence certains aspects sur lesquels nous reviendrons par la suite, notamment lorsque le sens « courant » est en désaccord clair avec la définition scientifique du même concept ou trop proche - amalgame - d'un autre concept comme celui de *stabilité* (texte en rouge) ou si elle est ambiguë (texte en orange) du point de vue scientifique.

L'équilibre

Premièrement, on ne peut qu'être frappé par la polysémie de ce mot. On remarque que le premier¹⁵ sens « commun » d'*équilibre* : « Attitude ou position stable », est associé au terme *stabilité* d'une manière très différente de ce qu'il se passe en science ; on est ici à la limite de la synonymie, ce qui n'est évidemment pas le cas dans aucun des domaines scientifiques cités. Ceci se retrouve dans la lexicographie du mot *stabilité* présentée ci-après.

Le terme *équilibre* est issu du domaine de la « science des poids » du moyen âge (voir le paragraphe 1.2.1) et pour ce qui concerne le domaine scientifique, sa définition a évolué depuis (même si l'on se restreint au domaine de la mécanique) jusqu'à la définition actuelle qui ne fait plus référence à cette discipline. En revanche, on peut remarquer

13. Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales du CNRS (www.cnrtl.fr).

14. En intelligence artificielle, certaines bases de données de connaissance du *sens commun* comme *Open Mind Common Sens* utilisent d'ailleurs les assertions de type descriptifs sur l'usage des mots comme celles présentes dans les lexicographies (Singh, Lin, Mueller, & Lim, 2002)

15. Dans la liste donnée par le CNRTL, nous ne considérons pas que cet ordre soit une information en elle-même.

que plusieurs aspects du sens courant, commun, actuel, qui sont directement issus de ce sens « historique », ont conservé une référence forte avec lui, comme par exemple dans « l'égle pesanteur de deux corps », « [...] dont le poids est partagé également des deux côtés d'un point d'appuis [...] » ou « Faire contrepoids ».

On peut noter que les définitions espagnoles rencontrées (présentées en annexe) recouvrent presque toutes ces significations, l'aspect synonymique « équilibre-stable » en étant cependant absent.

Plus généralement, on observe une prédominance de l'aspect « égalité » (statique) sur l'aspect « constance » (dynamique) dans ces définitions. Ceci se retrouve d'ailleurs dans la lexicographie de l'antonyme *déséquilibre* qui est, lui, présenté comme un synonyme d'*inégalité*, de *disparité*, alors que le contraire « scientifique » de l'équilibre pour la mécanique (rarement utilisé tel quel) serait plutôt de l'ordre du mouvement accéléré, de l'idée de *variation* dans le temps, c'est-à-dire le contraire de *stationnaire*.

La stabilité

On constate que pour le sens commun et pour de nombreux domaines (passages surlignés en rouge), la définition de *stabilité* est très proche de celle d'*équilibre* (cf. paragraphe précédent). On remarque par exemple les définitions suivantes qui sont très claires sur ce point : « Caractère de ce qui ne varie pas, de ce qui demeure au même niveau, à la même valeur », « Constance dans la conduite, les choix » ou encore « Synonyme de permanence ».

D'autre part, l'influence historique se fait moins sentir ici que dans le cas de l'*équilibre* et finalement la différence entre les premières définitions - historiquement parlant - et les définitions courantes actuelles, est assez marquée (les définitions médiévales étant finalement peu nombreuses). Par ailleurs, nous n'avons pas non plus mis ici les définitions d'*instabilité* mais il ressort d'un examen rapide de ce terme¹⁶ qu'elles sont très proches de l'antonyme d'*équilibre* et d'ailleurs, un des sens proposé par le CNRTL fait explicitement référence à l'idée de « [...] rupture possible de l'équilibre [...] » ce qui ne correspond pas au sens scientifique de ce mot puisque rappelons-le, *stable* ET *instable* sont des caractéristiques d'états d'équilibre.

16. Consultable ici : <http://www.cnrtl.fr/definition/instabilit%C3%A9>.

4.2.2 Influences du langage et des expériences quotidiennes

On pourrait penser qu'une part des difficultés de compréhension des étudiants provient de l'utilisation des mêmes termes avec des sens différents – ce que l'on appelle *polysémie* (Victorri, 1996) – dans les différents domaines ou situations dans lesquelles ils sont susceptibles de les rencontrer, mais, sans en avoir pleinement conscience. Prenons un exemple avec le mot *stable* : Alors que dans le cas du mot *table*, pour lequel la « table » de multiplication n'a que peu de choses à voir avec la « table » à manger car le contexte assure une discrimination suffisante entre les deux sens du mot¹⁷, la nature du lien entre les sens du mot *stable* dans « des résultats scolaires stables » et « un pendule en équilibre stable » semble différente. On s'attendrait en fait à ce que le sens de *stable* dans les deux cas soit le même que la variation soit minime car le premier procède d'une analogie avec le second. Ce n'est cependant pas exactement le cas. Le sens porté dans le premier cas indique que les résultats scolaires ne varient pas, ce qui serait en accord avec la définition *scientifique* de l'équilibre et pas de la stabilité, alors que dans le cas du pendule, la stabilité indique un retour autonome à la position d'équilibre après une perturbation, ce qui, là, correspond bien à une définition scientifiquement acceptable. Mais cette polysémie est-elle si explicite ? Tout se passe en effet comme si le contexte n'était pas suffisant pour discriminer les différents sens du mot parce qu'en réalité on considère que c'est le même sens qui est véhiculé et qu'il s'agit seulement d'une transposition d'un domaine à un autre, ce qui, en fait, n'est pas le cas.

On observe dans cet exemple que, d'emblée, et c'est pour cela que nous avons choisi ce point de vue, la frontière entre *équilibre* et *stabilité* est extrêmement floue en dehors du cadre scientifique, ce qui peut poser des difficultés dans le milieu scolaire.

Le sens commun du terme équilibre a pu être mis en évidence par un questionnaire en ligne (inclus dans un questionnaire plus complet décrit en annexes). Dans ce questionnaire, on a demandé aux étudiants de dire ce qui, parmi les situations ou objets de la vie quotidienne, représentait pour eux le concept d'*équilibre*. Ceci, sans préciser un domaine particulier mais le questionnaire a été donné à des étudiants presque exclusivement engagés dans des cours de type « commande des systèmes » en France et en Colombie et on aurait donc pu s'attendre à ce que les exemples choisis soient majoritairement inspirés de situations rencontrées en milieu scolaire.

En fait, les termes qui reviennent le plus souvent chez les étudiants français sondés (44 étudiants d'école d'ingénieur) sont : le pendule (7 %), l'eau (7 %), le repas (7 %) et

17. En classe, par exemple, si l'on demande de « chercher des valeurs dans une table ».

chez les étudiants colombiens (366 étudiants d'université sondés) : la balance (22,4 %), L'eau (4 %), les études : (4 %), la vie (< 4 %), la température (< 4 %), marcher (< 4 %), l'équilibre (3,5 %), le vélo (< 3 %), le corps humain ou la stabilité.

La signification, ou plus largement les *idées* associées à l'équilibre ont aussi été étudiées par Pedreros Martín (2013) auprès d'étudiants suivant une formation pour devenir enseignant dans l'enseignement primaire¹⁸ en Colombie. Cette étude, qui portait sur 72 étudiants des spécialités *physique, biologie, chimie et conception technologique* montre que, hormis les domaines disciplinaires, les idées qui sont proposées correspondent majoritairement à « la vie », « la santé », « les ressources naturelles », « la nature », « le corps humain » ou « la société ».

Il est frappant de constater que les situations quotidiennes majoritaires d'équilibre de type mécanique ne sont pas données spontanément, c'est le cas notamment de tous les objets au repos qui nous entourent (livres, tables, chaises, papiers, etc.) et dont on peut penser qu'elles « passent inaperçues ». La balance, elle, paraît sur-représentée dans les réponses des étudiants colombiens interrogés qui, pour l'immense majorité, n'en rencontrent pas de manière quotidienne¹⁹. D'autre part, les situations ou objets proposés sont très variés et font appel à des représentations très différentes d'un étudiant à l'autre (chaque objet ou situation n'apparaissant pas plus que dans 4 % des cas en dehors de la balance) couvrant presque tous les sens répertoriés par le CNRTL pour ces deux mots.

Il ne serait pas étonnant que le sens (approximatif) commun des termes *équilibre* et *stabilité* soit utilisé aussi bien dans la vie de tous les jours qu'à l'école sans une réelle distinction. Plusieurs conceptions erronées (ou alternatives) en mécanique à propos de ces concepts sont sans doute issues directement de ces transferts. On pense notamment aux conceptions faisant intervenir l'image de la balance « classique »²⁰ et conduisant à n'identifier que les situations d'égalité de hauteur (horizontalité du fléau (Ortiz et al., 2005) ou altitude identique des masses dans le cas des systèmes de poulies (Gunstone, 1987)), comme unique critère d'équilibre²¹.

18. Licienciatura.

19. Nous n'avons pas mené d'étude systématique sur ce point précis mais les données socio-économiques des étudiants interrogés auxquelles nous avons pu avoir accès - provenant d'un examen national appelé *Saber 11* qu'ils passent avant l'entrée à l'université - le laisse à penser.

20. Il faut comprendre ici, balance de type Roberval pour laquelle l'équilibre ne peut être atteint que lorsque les masses sont identiques dans les deux plateaux et donc lorsque le fléau est horizontal

21. Il est très intéressant de remarquer que cette conception horizontale de l'équilibre est très rapidement acquise. Dans les études sur l'équilibre menées par Piaget, par exemple celle issue de dans (Piaget & Fluckiger-Geneux, 1972, p. 194) dans laquelle on demande aux sujets de « [...] trouver le point d'équilibre [...] » de plaquettes triangulaires et rectangulaires trouées ou non posées sur un clou

Parmi ces conceptions « attendues » (c.-à-d. que l'on peut inférer à partir de ce qui vient d'être présenté), on peut regrouper notamment celles qui identifieraient « équilibre et stable »²², « équilibre et instable »²³ ou « équilibre et horizontal »²⁴.

Nous n'allons pas aller plus loin dans l'analyse des processus, mentaux par exemple, qui conduisent, ou pourraient conduire, aux conceptions que nous allons voir dans la suite. On peut cependant imaginer lister les situations de la vie quotidienne dans lesquelles interviennent l'équilibre et la stabilité et à partir desquelles on peut penser que pourraient se construire les premières conceptions à propos de ces concepts (influencées ou non par le langage). Il pourrait alors être intéressant de construire deux listes : une qui contiendrait les situations dans lesquelles on peut mettre en évidence l'équilibre de manière scientifique et claire, et une autre qui contiendrait les situations dans lesquelles il est effectivement perçu (à tort ou à raison). Par exemple, un objet abandonné à lui-même sans vitesse initiale, tel qu'un livre posé sur une table (ou la table, elle-même), est un des cas d'équilibre mécanique les plus courants dans la vie quotidienne que les élèves proposent rarement de manière spontanée (cf liste du paragraphe précédent). La balance quant à elle, étant pour ainsi dire « le » prototype de l'équilibre, elle est associée spontanément à l'équilibre bien que cela ne soit vrai qu'avec les balances présentées avec un fléau horizontal. A partir de ces cas, on pourrait identifier les cas qui relèvent d'une interaction passée avec le sujet (la balance par exemple) et les autres (les objets au repos, par exemple) et, dans une approche « piagétienne », en déduire leurs effets (ici positifs²⁵) sur la construction des conceptions du sujet (Piaget, 1936).

contre une paroi et de comparer les positions du clou avec celle d'un fil devant permettre de les tirer « tout droit », il n'est à aucun moment spécifié que l'on cherche un équilibre *horizontal*. Mais, tant les attentes de l'expérimentateur que les actions du sujet vont dans ce seul sens alors que dans les deux cas l'équilibre est de nature différente : stable pour la traction et instable pour le clou. Dans le cas de la traction, il y a donc une possibilité pour « tirer tout droit » l'objet incliné par rapport au fil - c.-à-d. sans rotation - donc dans une position d'équilibre inclinée, position absente des extraits d'entretiens répertoriés. Au lieu de cela, quand l'expérimentateur demande à un des enfants « Qu'est-ce que c'est l'équilibre ? », l'enfant répond « Quant il y a le même poids des deux côtés »

22. Venant de « Attitude ou position stable » ou « Caractère de ce qui reste en place, sans bouger ni tomber » par exemple

23. Venant de « Dans une position parfois difficile, précaire... »

24. Venant de « Caractère de ce qui ne varie pas, de ce qui demeure au même niveau, à la même valeur »

25. On pourrait penser que c'est justement le manque d'interactions entre le sujet et ces objets qui les rends comme « inexistants ».

4.3 Le contexte scolaire

4.3.1 Introduction

En substance, pour eux-mêmes, les concepts d'équilibre et de stabilité ne sont pas étudiés avant le lycée²⁶ en France et avant l'université en Colombie. Cependant, il existe un nombre non négligeable de situations scolaires où ils apparaissent de manière plus ou moins directe - y compris dans le langage employé - et ce, dès la maternelle (ou son équivalent à l'étranger). Examinons-les en prenant comme point de départ le niveau ingénieur.

4.3.2 L'équilibre et la stabilité dans les programmes français

On trouve de manière explicite la mention d'*équilibre* dans les programmes des lycées et plus précisément des classes préparatoires aux grandes écoles (CPGE). Les programmes des filières MPSI, PCSI et PTSI contiennent par exemple une étude des oscillateurs harmoniques pour lesquels on propose de chercher des positions d'équilibre (par une approche basée sur les équations différentielles). L'équilibre est aussi abordé lors de l'étude des frottements (lois de Coulomb) et de celle du mouvement des points matériels, d'un point de vue énergétique, pour ce qui concerne la mécanique mais aussi lors de l'étude des systèmes thermodynamiques (équilibre liquide-vapeur, pression-température, etc.) et de celle des forces de Laplace (et plus généralement des phénomènes liés au magnétisme). Seule la première année fait abondamment mention de la terminologie « équilibre mécanique », celle-ci proposant l'examen de systèmes mécaniques dans le cadre des référentiels galiléens. Elle n'apparaît pas dans les programmes de la deuxième année qui, elle, aborde les problématiques liées aux forces d'inertie dans les référentiels en mouvement (circulaire, par exemple) sauf pour l'étude de l'« équilibre d'un fluide dans un référentiel non galiléen »²⁷. De même, en ce qui concerne la thermodynamique, la deuxième année propose l'étude des régimes stationnaires ou permanents pour les systèmes ouverts, il n'est donc pas fait mention du terme *équilibre*. Pour finir, on trouve mention des concepts d'équilibre et de stabilité en mathématiques pour la seconde année des filières PT, PTC, TSI, PC, etc. lors de l'étude de la stabilité et des états d'équilibre dans la résolution des systèmes d'équations différentielles linéaires à coefficients constants).

26. Et principalement en ce qui concerne l'équilibre, la stabilité étant, elle, enseignée majoritairement en premier cycle d'études supérieures.

27. Programme de physique de la filière PC.

On peut noter que la terminologie « équilibre dynamique » est présente seulement dans le programme de la filière BCPST, pour la discipline Science de la Terre, dans le cadre l'étude de la dynamique des enveloppes terrestres (avec l'équilibre vertical archimédien). Au niveau secondaire, au lycée, il est abordé explicitement en chimie (classes de terminale série S), et, de manière implicite, on peut penser qu'il est évoqué en sciences physiques lors de l'étude des transferts thermiques (puisque'il est question d'évolution des flux thermiques au cours du temps) ou lors de l'étude des caractéristiques du vecteur accélération dans les différents types de mouvements (uniforme, accéléré, etc.). De même, dans la partie *Sciences de l'ingénieur* du programme de terminale S, il n'est pas fait explicitement référence à l'équilibre mais les thèmes comme « La chaîne d'énergie », où il est question de *bilan énergétique d'un système*, ou « Ordre d'un système », dans lequel on examine des comportements de systèmes face à des entrées de type *échelon indiciel*, sont de nature à évoquer le terme d'*équilibre*.

Il en est de même pour les programmes de physique-chimie des filières technologiques comme par exemple la série STI2D ou STL dans lesquels on demande aux élèves de première de prévoir l'évolution du transfert thermique entre deux systèmes (et de manière explicite, l'étudiant doit être en capacité de prévoir « leur état final ») ou en terminale, de « Relier l'accélération à la valeur de la résultante des forces [...] ».

(voir www.eduscol.education.fr/pid26017/programmes-du-lycee.html).

Pour ce qui est du collège, bien que l'équilibre n'apparaisse pas de manière explicite dans les programmes de science, on le trouve évoqué dans les aspects « équilibre nutritionnels » en troisième ou indirectement dans le programme de technologie lors de l'étude des leviers (souvent l'occasion de comparaisons de masses à l'aide de dispositifs proches de la balance). Il est par contre tout-à-fait explicite dans les programmes d'éducation physique et sportive. On y trouve pas moins de cinq mentions telles que des « [...]bonds enchaînés et équilibrés » ou encore l'exercice des « fonctions sensorielles d'équilibre ».

Concernant l'école primaire, le programme du cycle des approfondissements²⁸ mentionne explicitement l'équilibre dans la partie « Les objets techniques » et le lie à l'étude des leviers et balances. D'autre part, on peut noter que le terme équilibre apparaît aussi dans les documents d'accompagnement comme les « Progressions pour le cours préparatoire et le cours élémentaire première année - Éducation physique et sportive » dans lequel on trouve la plus forte occurrence de ce terme (15 pour 10 pages). On y demande aux élèves de « Franchir des obstacles en étant en équilibre », « S'équilibrer », « Chercher des

28. Qui débute au CE2, et se termine au CM2

équilibres », « [...] se repérer dans des formes d'actions inhabituelles mettant en cause l'équilibre [...] », « Travailler sur les appuis pieds-mains et les transferts d'équilibre », etc. Dans les documents d'accompagnement relatifs aux sciences expérimentales et à la technologie on trouve bien le terme *équilibre* mais les compétences attendues sur ce thème évoquent seulement la « réalisation d'équilibres (mobiles, balances romaines, Roberval...) » et pas par exemple la recherche d'objets en équilibre ou utilisant un équilibre.

La recherche des mentions du concept de stabilité dans les programmes est, sans surprise, globalement infructueuse avant le baccalauréat. Et ensuite, entre le baccalauréat et le niveau ingénieur, on trouve l'étude de la stabilité dans les portions du programme relatives à l'équilibre dans une approche énergétique (avec l'analyse de graphes) ou lors de l'étude des équations différentielles.

Dans tous le cursus allant de école primaire au lycée, il n'en est pas fait mention explicitement, à part en éducation physique et sportive (et plutôt à propos du lien *déséquilibre/instable*) dans les documents d'accompagnement de l'école élémentaire.

4.3.3 L'équilibre et la stabilité dans les programmes colombiens

En Colombie, il n'y a pas de « programme » équivalent à celui de la France, seulement ce que l'on appelle des *standards* (*estandares*) qui désignent les compétences attendues pour l'éducation préscolaire (un an obligatoire), basique (neuf ans) et moyenne (deux ans) mais de manière assez générale. On y trouve l'équilibre au niveau de l'étude des écosystèmes et plus particulièrement dans « l'analyse de l'équilibre dynamique entre ses populations »²⁹ et « l'identification des changements et d'équilibre chez les êtres vivants et dans les écosystèmes »³⁰ et en physique-chimie au grades 10 et 11 d'une part au sujet de « la caractérisation des changements chimiques en conditions d'équilibre »³¹ et de l'établissement de relations entre la stabilité et le centre de masse d'un objet³².

Comme on peut le constater, ces apparitions de l'équilibre et de la stabilité dans le cursus scolaire sont donc, là aussi, très rares, comme en France, et les textes étant relativement flous quant aux connaissances à acquérir, tout dépend du niveau d'approfondissement proposé par les enseignants. Le cas de l'étude de la stabilité par exemple

29. Caracterizo ecosistemas y analizo el equilibrio dinámico entre sus poblaciones

30. Identifico condiciones de cambio y de equilibrio en los seres vivos y en los ecosistemas.

31. Caracterizo cambios químicos en condiciones de equilibrio.

32. Establezco relaciones entre estabilidad y centro de masa de un objeto.

est très représentatif : l'équilibre n'est pas mentionné. Mais comment dans ce cas amener les problématiques de stabilité sans évoquer l'équilibre ?

A l'université, les programmes sont assez libres et nous allons donc nous restreindre à l'examen du curriculum de *pregrado*³³ proposé par l'université dont sont issus les étudiants interrogés dans notre étude. L'équilibre est étudié dans le tronc commun de physique lors du cours « Équilibre, conditions d'équilibre, centre de gravité ; Résolution de problèmes d'équilibre de corps rigides », dans celui sur les « Particules en équilibre et dynamique des particules », dans celui sur le « Mouvement des satellites, lois de Kepler et mouvement des planètes ; équilibre/gravitation ». Il apparaît aussi en chimie dans l'étude des équilibres chimiques (en cinétique et en thermodynamique).

4.4 Conclusion

Les premiers contacts avec l'équilibre à l'école primaire en EPS³⁴ font la part belle aux situations d'équilibre *inhabituelles*³⁵. Du côté de la physique, même si l'on s'intéresse très tôt aux objets technologiques utilisant des équilibres, ces occasions ne concernent, là encore, que des cas particuliers de systèmes dont on précise rarement la nature peu représentative. Dans le même temps, le langage courant fait une utilisation très libre et abondante de ces termes, y compris de celui de stabilité, qui est complètement absent du registre scolaire. Il semble donc tout-à-fait probable que cela entraîne une association forte entre les concepts d'*équilibre* et de *stabilité* et ces expériences langagières et empiriques quotidiennes. Ceci entraîne de plus, d'une part, que les élèves conçoivent la balance comme la référence scolaire des systèmes en équilibre, avec une représentation presque exclusivement horizontale de celui-ci pour les objets de type « à leviers » ou « à poulies », d'autre part, qu'ils associent très rapidement les situations (y compris corporelles) instables, limites, comme les seuls cas d'équilibre et que dans le même temps l'instabilité soit assimilée au déséquilibre (par un jeu de raisonnement par contraire venant de « stable = équilibre »). Comme à aucun moment avant l'université, on ne propose un rapprochement³⁶ entre toutes ces *expériences*, on peut supposer que ces différentes conceptions

33. Terme qui désigne la scolarité avant le diplôme d'ingénieur soit les quatre premières années de l'université

34. Éducation Physique et Sportive

35. Terminologie directement extraite des documents officiels d'accompagnement des programmes

36. En général par le biais de l'étude des équations différentielles.

pour le moins incompatibles³⁷ ne provoquent aucun conflits dans l'esprit des étudiants. On observe même que jusqu'à l'entrée dans les cursus ingénieurs, le découpage disciplinaire et les cas d'étude de ces concepts ... Ceci favoriserait une conception morcelée très dépendante du contexte (*cf.* l'analyse à partir des facettes de connaissances ou des *p-prims* du chapitre précédent).

37. Il est intéressant de faire un petit détour par les sciences cognitives pour noter que si l'on considère le fonctionnement cérébral dans sa globalité, la logique ne ferait pas partie des règles de base de l'inconscient. Il est donc illusoire de penser que les situations mettant en jeu des concepts identiques seraient *automatiquement* reliées, par exemple pour des raisons de compatibilité logiques. Ceci est appuyé par les modèles cognitivistes de type « fodorien », massivement modulaires, hybrides (Bermúdez, 2012, p.322) ou de type « Dual Process Theories » (DPT) qui séparent des voies conscientes et inconscientes des processus d'apprentissage (majoritairement basées sur des processus inférentiels statistiques – bayésiens – en ce qui concerne la DPT, voir note 55). Pour plus de détail sur ce dernier modèle, voir le volume 11, No. 1 de la revue *Mind and Society* consacré intégralement à ce sujet.

Conclusion

Plusieurs études montrent que les étudiants d'un niveau universitaires éprouvent des difficultés pour associer correctement les concepts qui conviennent aux situations impliquant des équilibres stables ou non – notamment mécaniques – statiques ou dynamiques. Cela leur pose problème, notamment lorsqu'il est question d'utiliser ces concepts pour résoudre certaines questions spécifiques³⁸ telles que celles que l'on rencontre dans le domaine de l'automatique, où l'on est souvent confronté à des systèmes complexes (et dynamiques).

La formation « pré-ingénieur » des étudiants comprend l'étude de ces concepts – de manière relativement tardive – dans plusieurs disciplines, de manière non coordonnée et essentiellement par une approche qui favorise l'apprentissage des seules définitions, procédures de calculs et critères de vérification au détriment du développement de compétences de résolution de problèmes. Dans le même temps, il est fait un usage fréquent et approximatif de ces concepts dans la vie quotidienne en lien avec des expériences empiriques souvent trompeuses³⁹. On peut penser que les élèves développent très tôt des conceptions erronées de ces concepts que l'École contribue partiellement à renforcer, d'une part, en préservant un morcellement disciplinaire qui, dans ce cas précis, est scientifiquement infondé puisque l'on s'intéresse aux mêmes concepts et d'autre part, en privilégiant l'étude de cas trop spécifiques.

Ils arrivent finalement en formation d'ingénieur avec des conceptions, relativement à ces concepts, que l'on peut qualifier de peu opérationnelles et éloignées du savoir de référence, malgré l'enseignement reçu. On peut supposer que ces conceptions sont relativement résistantes au changement si l'on considère la quantité importante d'expériences, académiques ou non, « renforçantes » qu'ils ont pu rencontrer depuis la maternelle jusqu'en premier cycle d'études supérieures.

Nous n'allons pas développer l'aspect relatif aux « remédiations » possibles à l'école primaire, au collège ou au lycée mais il est bien entendu tout à fait concevable de faire des

38. L'évolution d'un système à partir d'une position d'équilibre en fait partie, de même que l'identification de situations d'équilibre.

39. On pense notamment aux cas très particuliers comme celui de la balance, des châteaux de cartes, de la position du corps, etc. voir page 73

liens, très tôt dans la scolarité, entre les expériences quotidiennes et scolaires mettant en jeu ces concepts en utilisant un langage adapté ne favorisant pas les amalgames. On pourrait, par exemple, parler systématiquement d'« équilibre horizontal » dans le cas de la balance, proposer d'autres cas d'équilibre⁴⁰ et pourquoi pas introduire très tôt des notions générales et adaptées aux plus jeunes de concepts comme celui de la « stationnarité ». Ceci pourrait permettre d'introduire, très tôt dans la scolarité et de manière non disciplinaire, le concept d'équilibre, par exemple dans une optique de développement de *modèles précurseurs* (Lemeignan & Weil-Barais, 1993 ; Ravanis, Koliopoulos, & Boilevin, 2007).

Notre point de vue se voulant résolument orienté vers l'enseignement supérieur, nous allons plutôt tenter dans la suite de définir et de mettre en place une autre approche de ces concepts que celle généralement adoptée dans l'enseignement dit « classique », en nous appuyant justement sur les conceptions - erronées ou non - des étudiants, et adaptée au niveau ingénieur (en école spécialisée en France ou à l'université en Colombie).

40. Soit des positions d'équilibre non horizontal pour la balance, soit d'autres objets-systèmes en équilibre, courants.

DEUXIÈME PARTIE

Étude d'une ingénierie didactique adaptée



Introduction : l'approche « évolutionniste »

5.1 Introduction

Dans la partie précédente, nous avons utilisé des situations d'apparence statique, pour étudier la compréhension des concepts d'équilibre et de stabilité dans le cas de systèmes dynamiques. Cette manière de procéder qui pourrait paraître paradoxale¹ met cependant en lumière un aspect particulièrement peu utilisé dans les approches classiques d'enseignement de ces concepts et les évaluations académiques : la prévision de l'évolution d'un système. Pourtant, dans le cas très spécifique des systèmes dynamiques et plus encore à propos de ces concepts, les définitions mathématiques sous-jacentes sont des définitions que l'on pourrait qualifier de fondamentalement « évolutionnistes », proches de la description physique de « ce qu'il se passe » si l'on laisse libre le système, si on lui applique un signal de commande ou s'il est soumis à une perturbation. En effet, ces définitions font appel à un opérateur mathématique qui justement représente l'évolution d'une variable au cours du temps : la dérivée. Cependant, trop souvent, l'accent est mis en classe sur des critères purement calculatoires qui permettent de connaître l'état du système à un instant donné mais qui, paradoxalement, éludent l'aspect temporel. Ceci éloigne finalement l'étude du système (la description de son comportement) du système lui-même (c'est-à-dire, de son comportement effectif). Il est d'ailleurs, coutume de rechercher un modèle mathématique d'un système particulier, souvent par des méthodes assez « automatiques »² (voir, par exemple, celle utilisant le *Lagrangien*, proposée en annexe, page 225), puis de raisonner sur ce dernier, sans plus chercher à relier explicitement les caractéristiques de ce modèle aux caractéristiques du système. Or, quelques questions simples permettraient de pousser les étudiants à faire des liens afin de mieux comprendre

1. Voir la justifications dans le premier chapitre, page 2.3.2

2. C'est-à-dire, dont les étapes s'enchaînent mécaniquement.

le système : À quoi correspondent les positions d'équilibre des équations pour le système réel ? Sont-elles toutes réalisables physiquement ? Quelles sont les limites du modèle ? Quelles configurations physiques ne sont pas représentées par la modélisation ? etc.

5.2 Une nouvelle approche ?

On pourrait donc distinguer une approches plutôt classique, « statique », mettant en jeu par exemple l'application d'un bilan de forces et de moments pour ce qui concerne la mécanique classique (ou le calcul du taux d'avancement final d'une réaction, en chimie), qui masque finalement l'*évolution* du système, d'une approche que l'on pourrait qualifier d'« évolutionniste » qui, elle, serait focalisée soit, *a posteriori*, sur les changements intervenus, soit *a priori*, sur les changements qui pourraient intervenir, dans un système au cours du temps, en fonction des actions du milieu extérieur. Cette dernière approche sera appelée *approche évolutionniste* dans la suite, et la première, *approche disciplinaire*.

En ce qui concerne l'approche disciplinaire, on peut trouver dans chaque domaine un ou plusieurs critères particuliers pour juger de l'équilibre ou de la stabilité, critères que l'on retrouve dans les ouvrages de référence et sur lesquels nous n'allons pas nous arrêter (taux d'avancement ou minimum d'enthalpie libre pour un système chimique, somme des efforts extérieurs nulle pour un corps solide ou minimum énergétique, etc.). Pour ce qui est de l'approche *évolutionniste*, nous pouvons proposer une première définition générale directement issue du caractère *stationnaire* de l'état d'équilibre :

- L'équilibre est l'état d'un système qui demeure permanent dans le temps en l'absence de perturbations (extérieures) de celui-ci et de changement des ses variables de contrôle, s'il est commandé.

Cette définition ne se restreint donc pas aux seuls systèmes isolés mais englobe les systèmes en régime permanent (ou stationnaires) qui sont majoritairement rencontrés dans le domaine de la commande des systèmes (systèmes de type moteurs à courant continu pour lesquels on cherche à assurer une régulation de vitesse de rotation, systèmes de réservoirs de liquide pour lesquels on s'intéresse au niveau, systèmes thermiques avec régulation de température, etc.), comme nous l'avons indiqué au paragraphe 1.2.4, page

18.

Concernant la stabilité, on peut avancer cette définition :

- La stabilité est une caractéristique d'un état d'équilibre pour lequel le système y revient de façon autonome³ après un déplacement momentané⁴ de celui-ci.

Ces deux définitions sont accessibles à des étudiants de toutes les filières et ne présupposent qu'ils possèdent des connaissances de haut niveau, liées à un domaine spécifique (physique, chimie ou autre). Moyennant la remarque faite au paragraphe 1.2.4, page 18, ces définitions de nature opérationnelle sont applicables dans tous les domaines (le cas échéant, il faut définir le système considéré avec soin, notamment en ce qui concerne la définition de ses limites, conduisant à la prise en compte correcte des entrées, sorties et perturbations).

NOTE : Cette approche n'est pas tout à fait nouvelle, et, dans les programmes des années 50, (par exemple dans le programme de la classe de seconde de 1957, NATHAN) on présentait l'équilibre d'un corps solide (notons qu'il n'y a pas d'indication de référentiel) comme l'état d'un corps *immobile*. Bien que l'on puisse regretter l'absence d'indication explicite⁵ du référentiel ou du comportement du milieu extérieur, cette définition, contenait l'idée de permanence, de stationnarité, « absente »⁶ à l'heure actuelle des définitions proposées aux élèves.

5.3 Implications

Comme on peut le constater, cette approche ne fournit pas d'*explications* pour l'équilibre mais seulement une caractérisation de cet état, en somme, elle permet de savoir ce qu'il « se passe » dans le cas où le système possède cette caractéristique. Il y a cependant bien sûr des *explications* qui existent dans chaque discipline et qui sont, en général, enseignées lors de l'examen des critères associés : l'apparition d'un moment lors du déplacement de la position d'équilibre d'une balance par exemple, l'énergie associée

3. C'est-à-dire *par nature*, sans actions extérieurs.

4. C.-à-d. durant un temps fini.

5. Puisqu'implicitement le référentiel est présent par le biais de la *mesure* de l'immobilité.

6. Bien sûr, cet aspect est présent au travers de l'accélération et du calcul du bilan des efforts extérieurs, mais d'une manière finalement peut-être moins opérationnelle pour les élèves.

à un état ou plus rarement, les travaux virtuels (du poids). Dans la suite de notre étude, nous allons supposer que les étudiants concernés possèdent ces connaissances, même imparfaitement comme on l'a vu au chapitre précédent (ce qui n'est pas critique dans cette approche). Nous supposerons de plus, qu'après une analyse approfondie, ils sont en capacité d'en déduire l'évolution d'un système simple, comme une balance, même s'il ne le proposent pas spontanément, par exemple à cause d'un manque de lien, d'organisation, entre ces connaissances et la connaissance des situations dans lesquelles elles sont utiles. Certains auteurs appellent ces organisation de savoir des *schémas de problèmes* (de Jong & Ferguson-Hessler, 1996) et l'acquisition de ceux-ci réclame un entraînement particulier que nos étudiants n'ont pas obligatoirement suivi dans leur scolarité antérieure (en général ceci est particulier aux démarches dites « de résolution de problème »). C'est pourquoi nous ne proposerons pas de systèmes trop « exotiques » par la suite mais nous nous appuierons sur des exemples que les étudiants ont déjà rencontrés, pour lesquels ils possèdent des éléments de connaissance relativement à leur fonctionnement, et nous focaliserons sur l'utilisation de ces connaissances dans un raisonnement de type « évolutionniste ».

En mécanique, par exemple, le comportement attendu serait que les étudiants soient capables de passer d'un critère disciplinaire à l'évolution du système selon un raisonnement proche de celui-ci : un système (mécanique) est en équilibre dans un référentiel si la somme des efforts extérieurs est nulle, ce qui, en vertu du principe fondamental de la dynamique, implique une accélération nulle pour le système considéré donc, pas de changement de mouvement, soit un état stationnaire⁷. Dans ce cas, si l'on possède une *image*⁸ de l'état du système en deux instants différents et que cet état n'est pas modifié (en l'absence d'actions extérieures) alors on peut en déduire que c'est un état d'équilibre.

Dans un autre domaine (chimie, système électromécanique, etc.), il conviendrait bien évidemment de vérifier au préalable le degré de linéarité du système (lors de sa définition) pour pouvoir en tirer une conclusion pertinente (par exemple, avec un système ayant un comportement aléatoire dans le temps, on ne pourrait en effet tirer aucune conclusions de cette observation). Cette démarche implique donc un certain degré de connaissance du système pour pouvoir faire les hypothèses adéquates, le cas échéant (ne pas s'écarter trop de l'état d'équilibre, par exemple, autour duquel on peut considérer le

7. Tout ceci, en ayant pris soin au préalable de bien définir le système.

8. Au sens large, c'est-à-dire un « enregistrement »

système suffisamment linéaire).

Telle que nous l'avons définie, l'approche *disciplinaire* est une approche dont la mise en œuvre réclame l'application d'un critère propre au domaine considéré alors que l'approche *évolutionniste* se veut plus transdisciplinaire, indépendante de la discipline considérée. En fait, on peut voir les critères disciplinaires comme des conséquences de l'application de cette approche générale. Cependant, historiquement, ils ont souvent été trouvés en amont et ont servi de base pour construire la définition générale, qui relève finalement des mathématiques et fait suite à une unification des différentes expressions du comportement des systèmes considérés (par le biais des modèles sous-jacents basés sur des équations différentielles⁹ (Von Bertalanffy, 1969)).

On pourrait donc être tenté de dire qu'il y a une approche montante¹⁰, « historique », allant des critères disciplinaires vers un formalisme mathématique général et une approche descendante, du formalisme mathématique vers la déclinaison en différents critères disciplinaires. L'enseignement classique procéderait plutôt de l'approche montante - mais de façon implicite - et nous proposons donc de « boucler » ces deux approches afin de rendre explicite ce « degré de généralisation ».

5.4 Conclusion

Comme évoqué au chapitre précédent, l'approche scolaire, essentiellement *disciplinaire*, peut favoriser les conceptions morcelées de l'équilibre et de la stabilité du fait du cloisonnement disciplinaire inhérent à celle-ci et, par conséquent, participer à augmenter l'influence du contexte dans les situations étudiées. En effet, il est hautement probable que les liens entre les divers critères disciplinaires, les situations d'équilibre d'objets différents ou les configurations différentes d'objets déjà étudiés ne se fassent pas « naturellement » (voir note 55 et Solaz-portolés & López Sanjosé, 2008). Le questionnaire « connaissances » exposé en fin de la partie précédente permet de se rendre compte que la connaissance des critères disciplinaires ne suffit pas à résoudre un problème simple ou à répondre à une question sur un système légèrement différent des cas classiques, ce qui laisse à penser que le caractère opérationnel de ces critères n'est pas garanti en l'état actuel de l'enseignement de ces concepts.

9. Mais pas seulement.

10. Si l'on considère une échelle de généralisation allant du moins général, en bas, au plus général, en haut.

Cependant, en vertu de son pouvoir explicatif, il n'est pas question d'abandonner (ou seulement passer sous silence) l'approche *disciplinaire* et ses critères au profit de l'autre mais bien plutôt de favoriser les deux approches et d'explicitier les liens qui les unissent. L'idéal, serait de tester un enseignement du concept de l'équilibre par une approche « évolutionniste » avant celui des approches disciplinaires, et prévoir un « rappel » de cette approche dans chaque discipline. Il faudrait, pour cela, intervenir très tôt dans le cursus académique (à l'école primaire, par exemple) et attendre que ces élèves arrivent jusqu'à l'université pour en évaluer les bénéfices dans domaine de l'automatique... Ceci est évidemment difficilement réalisable.

Nous allons donc nous attacher à étudier les apports d'une telle approche, en complément de ce qui se fait déjà, au niveau universitaire, en considérant que les étudiants possèdent un minimum d'outils disciplinaires (définitions et critères), et, que celle-ci va les aider à faire les liens adaptés entre ces critères et l'évolution d'un système.

Dans la suite, notre approche « évolutionniste » sera appliquée prioritairement dans le champs de la mécanique classique, l'accessibilité directe des phénomènes y étant, en effet, plus « simple ». Nous ne disons pas que tous les aspects de ces concepts y sont directement accessibles par l'observation (nous avons d'ailleurs exposé les multiples raisons qui peuvent rendre cette observation contre-productive, dans la partie précédente), mais, dans les autres domaines, sans recourir à un quelconque moyen de mesure, il est très difficile d'accéder aux variables d'intérêt d'un système (température, concentration, tension, courant, etc.). Ceci n'est pas trop restrictif puisqu'il est entendu que l'on espère un certain « transfert » vers d'autres disciplines, ce que l'on tentera d'évaluer dans un travail ultérieur.

Le cadre de l'ingénierie didactique

6.1 Introduction

L'ingénierie didactique est apparue dans les années 1980 et fut formalisée tout d'abord en didactique des mathématiques en prenant appui sur la théorie des situations didactiques (Brousseau, 1998). D'une part, et pour reprendre les mots de Douady (1994) :

L'ingénierie didactique désigne un ensemble de séquences de classe conçues, organisées et articulées dans le temps de façon cohérente par un *maître-ingénieur* pour réaliser un projet d'apprentissage pour une certaine population d'élèves..

L'idée première était de nommer le travail didactique, comparable au travail de l'ingénieur qui (Artigue, 1988, p. 283) :

[...], pour réaliser un projet précis, s'appuie sur les connaissances scientifiques de son domaine, accepte de se soumettre à un contrôle de type scientifique mais dans le même temps, se trouve obligé de travailler sur des objets beaucoup plus complexes que les objets épurés de la science et donc de s'attaquer pratiquement, avec tous les moyens dont il dispose, à des problèmes que la science ne veut ou ne peut encore prendre en charge.

D'autre part, l'ingénierie didactique désigne aussi une méthodologie de recherche qui permet de prendre en compte la complexité de la classe ainsi que de mettre à l'épreuve les constructions théoriques élaborées en les engageant dans un mécanisme de production ; c'est elle que nous allons détailler dans la suite et appliquer ensuite à notre recherche.

6.2 Un cadre méthodologique

L'ingénierie didactique est caractérisée par un schéma expérimental basé sur la conception, la réalisation, l'observation et l'analyse de séquences d'enseignement. Une

autre caractéristique remarquable de l'ingénierie didactique est liée à son mode de validation : il s'agit d'une étude de cas dont la validation est donc essentiellement interne (au contraire des méthodologies utilisant des schémas pré-test/action didactique/post-test). La phase de conception s'appuie sur un cadre théorique général et sur les connaissances didactiques déjà acquises dans le domaine étudié, mais aussi sur un certain nombre d'analyses préliminaires comportant :

- Une analyse épistémologique des contenus visés par l'enseignement
- Une analyse de l'enseignement usuel et de ses effets
- Une analyse des conceptions des élèves, des difficultés et obstacles qui marquent leur évolution
- Une analyse du champ des contraintes¹ dans lequel va se situer la réalisation didactique effective

Elle ne doit pas oublier de prendre en compte aussi les objectifs spécifiques de la recherche visée.

Ensuite, le chercheur choisit d'agir sur un certain nombre de variables du système (hors du champ des contraintes) : les *variables de commande*. On y distingue les variables globales (au sens de l'organisation de l'ingénierie) et locales, concernant l'organisation d'une séance ou d'une phase, comme celles liées à la gestion du milieu (variables de situation) ou à l'effet didactique souhaité.

Viennent ensuite :

- L'analyse *a priori*, que l'on peut voir comme l'analyse des rapports entre sens et situation (Artigue, 1988). Elle doit montrer en quoi les choix effectués permettent de contrôler les comportements des élèves et le sens de ces comportements, en se fondant sur des hypothèses dont la validation sera analysée dans la dernière phase de l'ingénierie (l'analyse *a posteriori*). Traditionnellement l'analyse *a priori* comporte une partie descriptive et une partie prédictive et comprend :

- une description des choix effectués par le chercheur-ingénieur,

1. Dans la relation didactique organisée entre le savoir, le maître et l'élève, pèsent un certain nombre de contraintes : ce sont un certain nombre d'éléments sur lesquels on ne peut agir et qui sont constitutifs, soit du savoir à enseigner, soit de la discipline, soit des institutions, etc., d'une certaine pratique (Philippe, 2004).

- une analyse de l'enjeu de la situation pour l'élève,
 - une prévision des champs de comportements possibles qui montre en quoi les comportements attendus des élèves, s'ils interviennent, résultent bien de la mise en œuvre de la connaissance visée par l'apprentissage.
- L'expérimentation
 - L'analyse *a posteriori* qui, en s'appuyant sur l'ensemble des données recueillies, permet lors de la confrontation avec l'analyse *a priori*, la validation indirecte des hypothèses de la recherche

6.3 Deux exemples

6.3.1 Introduction

Pour saisir quelques aspects importants de ce cadre méthodologique, voici deux exemples : un en mathématiques, dans lequel on peut voir l'utilisation d'une *situation fondamentale* pour donner du sens au concept visé, et un autre en physique, basé sur une reconstruction didactique d'un « fait »² historique (une situation que l'on peut qualifier de *non fondamentale*) visant le même objectif.

Le premier exemple d'ingénierie, fait jouer pleinement le cadre de la Théorie des Situations Didactiques de Brousseau (1998) par la recherche d'une *situation fondamentale*. Brousseau place au cœur de son approche de la didactique la notion de *situation* qui désigne l'ensemble des circonstances dans lesquelles une personne se trouve, et des relations qui l'unissent à son milieu. Dans ces situations, on distingue celles qui sont *didactiques*, c'est-à-dire pour lesquelles se manifeste directement une volonté d'apprentissage d'une notion, de celles qui sont *a-didactiques* (ou adidactiques), et qui sont les situations dans lesquelles l'élève est préoccupé par la seule résolution d'un problème proposé par l'enseignant et non par l'apprentissage d'une notion (pour une description plus détaillée, voir, par exemple, (Kuzniak, 2004)). Dans cette approche, un *concept* (mathématique) est l'objet qui résout une situation déterminée, de façon optimale³. Brousseau fait ensuite l'hypothèse qu'il existe, parmi toute collection de situations qui caractérise un même

2. Il ne s'agit pas à proprement parler d'un *fait* historique mais plutôt d'une situation fictive historique.

3. C'est-à-dire qu'il pourrait y avoir d'autres moyens pour résoudre cette situation, mais l'objet en question, le concept, est celui qui permettra d'y parvenir de la façon la plus directe et la plus adaptée.

concept mathématique, au moins une qui permet de générer toutes les autres (par variation des variables didactiques de la situation) : la *situation fondamentale*. L'utilisation du concept correspondant permettrait donc de résoudre cette situation de manière optimale. En corollaire, et c'est l'exploitation principale de cette situation, il apparaît que, étant confronté à cette situation, le seul fait de chercher à la résoudre – d'où le caractère a-didactique de celle-ci – va entraîner la construction du concept idoine par les élèves.

Dans le deuxième exemple d'ingénierie, la situation qui permet de donner du sens aux apprentissages visés ne fait pas appel à une situation fondamentale⁴, mais à une situation issue de l'histoire des sciences (ce qui en fait néanmoins une situation a-didactique). La première ingénierie se déroule sur plusieurs semaines et la seconde sur une seule séance (soit, une micro-ingénierie). Ces deux exemples illustrent bien la grande variété d'application de ce cadre.

6.3.2 L'apprentissage du théorème de Thalès

Cet exemple est issu de la thèse d'Eric Laguerre (Laguerre, 2005). Il s'agit d'une ingénierie visant à permettre aux élèves de 4^e de comprendre le sens et les rôles premiers du Théorème de Thalès, en faisant fonctionner les modèles dont ils disposent dans une *situation fondamentale*, afin de les faire évoluer. La Théorie des Situations est ici très adaptée du fait de l'existence d'une telle situation pour ce problème.

La connaissance des obstacles épistémologiques et didactiques ainsi que les variables didactiques ont permis de proposer aux étudiants une problématique comprenant 1) des aspects historiques liées au méso-espace, 2) les nombres réels et la mesure des longueurs, 3) la proportionnalité et 4) les figures prototypes et archétypes, l'orientation des figures et la distribution des longueurs (Laguerre, 2005, p.342).

L'auteur propose des situations a-didactiques basées sur les choix suivants :

- Les problèmes portent sur des objets petits, faciles à comparer (ce qui exclut le travail dans le macro-espace).
- La réussite ou l'échec sont relativement faciles à mettre en évidence.

4. Notons que ce type de situation paraît très difficiles à trouver en dehors des mathématiques, le caractère *optimal* de celle-ci posant problème (Orange, 2007). Certains auteurs ont également remis en cause l'existence de ce type de situation dans le domaine des mathématiques, lorsque par exemple, les concepts en jeu ont une caractéristique particulière comme celle d'être unificateur ou générique (appelé FUGS) (Bloch, 2005)

- Les formulations sont issues de la nécessité de communiquer à quelqu'un d'autre les informations nécessaires à la réalisation d'objets identiques à ceux dont dispose l'émetteur.

Ceci conduit à une étude du théorème de Thalès, d'abord placée dans le méso-espace (situation pratique dans l'espace du *monde réel* ; ici la salle de classe) puis modélisée dans le micro-espace (espace géométrique de la feuille). Le tout ayant pour but une mesure de distances inaccessibles qui rend nécessaire la modélisation et donne le *sens* à l'utilisation du théorème.

Plus précisément, Eric Laguerre décrit la séquence proposée pour des élèves de quatrième comme suit :

Une première séquence de la première activité (I) permet aux élèves de comprendre que les droites qui joignent les points d'un objet, en l'occurrence la coupe d'un escalier en carton collée sur une fenêtre, à leurs ombres projetées sur une feuille de papier sont parallèles. Dans cette même séquence, les élèves doivent également être capables de montrer que les mesures des longueurs de bandes de papiers collées parallèlement sur des fenêtres sont proportionnelles aux mesures de leurs ombres obtenues sur des plans parallèles au sol. Ces deux observations leur permettent de trouver une méthode pour calculer, par exemple, une hauteur inaccessible.

Pour commencer, ce calcul porte sur la hauteur d'une fenêtre de la classe pour ensuite passer, dans la séquence 2 de cette activité I à la hauteur d'un panneau de basket. Cette dernière situation est représentée par les élèves dans le plan.

Au cours de la séquence 3 de cette activité, les élèves doivent comprendre de façon pratique le phénomène d'éclipse de soleil en particulier en le schématisant. Cette nouvelle situation de référence pour le théorème de Thalès doit permettre, par la schématisation d'un astre au tableau noir, la mise en évidence des deux conditions nécessaires à une bonne visée avec une lorgnette : être en face et à la bonne distance.

Ces deux conditions sont indispensables au bon déroulement de la séquence 4 a) au cours de laquelle les élèves, en binômes, visent avec des lorgnettes toutes différentes et marquent leur lieu de visée sur le sol à l'aide d'un carton. Elles ont été construites de telle façon qu'à la fin de la séance, trois tas bien distincts de cartons apparaissent. La visée à l'aide d'une lorgnette percée de cinq trous met en évidence l'alignement des divers lieux de visée et le parallélisme de la droite qu'ils définissent avec la mire. Le but est alors de comprendre pourquoi les lorgnettes, pourtant très distinctes, se rassemblent de la sorte ?

Ainsi, l'objectif général de la séquence 4 b) est de savoir, sans se rendre

dans la cour, si une mire pourrait être vue à l'aide d'une lorgnette dont on connaît les caractéristiques.

Pour cela, une schématisation puis une modélisation du problème sont rendues nécessaires. Il est demandé aux élèves de produire un dessin générique de la situation de visée. Le schéma est retenu pour ensuite réellement passer à la phase de modélisation. Les dessins sur papier calque, à l'échelle, de toutes les lorgnettes de chaque tas obtenus précédemment sont alors effectués. L'équivalence des lorgnettes d'un même tas est obtenue en pratique par superposition des calques et par coïncidence de leurs champs de visée. Cette même équivalence est reliée ensuite à la proportionnalité.

La problématique pratique intervient lorsque les élèves ont à manipuler les lunettes, dans deux séquences, pour en retenir des informations utiles. Mais la problématique de modélisation prend le relais lorsqu'il s'agit d'anticiper sur les réponses qui pourraient être encore obtenues par l'expérience, par la visée, mais dont l'expérimentateur exige qu'elles soient trouvées dans le système symbolique du modèle de la situation élaboré par les groupes d'élèves. C'est à ce moment-là que la problématique géométrique commence. La conjecture peut faire partie des théorèmes connus lorsqu'elle est acceptée par tous. Cette dernière phase correspond à la partie justification, la démonstration servant à la validation des conjectures. Ce savoir est ensuite institutionnalisé et étiqueté comme devant être su par les élèves.

La propriété est démontrée grâce au théorème des milieux qui est lui-même démontré au début de l'activité. Un résultat équivalent est prouvé dans le trapèze. Ces deux théorèmes sont utilisés ensuite pour démontrer une proposition dans laquelle un côté d'un triangle est partagé en trois segments de même longueur. Puis, nous passons à quatre et l'on démontre le résultat pour un rapport décimal, rationnel, puis irrationnel. La suite de la démonstration consiste à mettre en évidence et à démontrer le théorème faisant apparaître trois rapports égaux. Le but est de distinguer ces deux théorèmes en montrant qu'ils se réfèrent à des formes de proportionnalités bien distinctes. Un exercice d'application de mesure de distances dans le méso-espace prend place à la fin. Enfin, un retour à la situation fondamentale, qui consiste à mesurer des distances inaccessibles, en l'occurrence un panneau de basket, est entrepris avec la construction et l'utilisation d'un télémètre.

L'analyse préliminaire à cette ingénierie, a montré l'existence de plusieurs difficultés de compréhension - récurrentes - chez les élèves quant à la l'apprentissage du théorème de Thalès. Entre autres, les élèves se réfèrent souvent à des figures particulières (dites archétypes ou prototypes) pour identifier les cas d'application du théorème, ne comprennent pas que certaines écritures de rapports de longueurs sont légitimes et d'autres non, ou s'attachent à l'orientation et à la distribution des longueurs dans la figure. L'ingénierie

proposée, et plus particulièrement les choix effectués quant à son déroulement, par le jeu de l'analyse dans les espaces méso et micro et la double approche de la proportionnalité interne (liée aux segments) et externe (liée aux triangles) vise à diminuer tous ces obstacles à la compréhension du théorème. Par exemple, les objectifs des premières activités comprennent la compréhension du parallélisme des ombres des bandes de papier et la « découverte » de la proportionnalité des mesures de celles-ci, donc une mise en évidence de la proportionnalité externe dans ce cas-ci (suivie par la réalisation de figures de type triangles « gigognes »).

6.3.3 La conservation du mouvement

Ce sont les cadres de la *reconstruction didactique* (Mäntylä, 2012 ; de Hosson, 2005, 2011a) et du *changement conceptuel* (Posner & Strike, 1992) qui sont utilisés ici, conjointement à celui de l'ingénierie didactique. La *reconstruction didactique* est comme le dit elle-même C. de Hosson : « [...] une séquence d'enseignement conçue sur la base d'informations historiques explicites et se donnant pour but l'apprentissage d'un concept ou d'une loi physique. ». Pour ce qui est du *changement conceptuel*, il s'agit d'une vision constructiviste de l'apprentissage considérant que celui-ci résulte de la construction de nouvelles conceptions par les élèves à partir de conceptions *initiales*, préexistantes et qu'il s'agit donc d'un processus de *changement* de conceptions (et pas d'une création *ex nihilo*, par exemple).

L'exemple suivant traite de la reconstruction didactique de la conservation du mouvement conçue à partir du *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* de Galilée, présenté dans (de Hosson, 2011b).

Cette séquence se donne pour but l'apprentissage du principe de conservation du mouvement dans le contexte de l'émergence du principe d'inertie. Parmi les difficultés répertoriées très tôt dans la littérature didactique (à la fin des années 70) dans le domaine de la mécanique classique figure celle liée à la conservation du mouvement. En effet, comme le précise C. de Hosson :

La plupart des élèves et des étudiants pense que le mouvement d'un corps nécessite l'action d'un moteur. Autrement dit, lorsque deux corps A et B en contact sont en mouvement, c'est que l'un (A) joue le rôle de moteur pour l'autre (B). Si le contact entre A et B est rompu, alors B perd instantanément la vitesse correspondant à l'action de A sur B : « Le fait que l'entraînement soit compris comme une cause de mouvement pour l'objet entraîné conduit,

par ricochet, à penser que la vitesse correspondante disparaît en même temps que le lien physique » (Viennot, 1996). Ce type de raisonnement conduit les élèves à prévoir qu'une bille lâchée par une personne immobile sur un tapis roulant (animé d'une vitesse constante) tombera derrière cette personne (Saltiel, 1978). Dans ce cas, l'absence de lien physique avec la personne supprime la composante horizontale de la vitesse de la bille ; ne subsiste alors plus que le mouvement vertical. Un tel raisonnement n'est pas conforme avec le principe de conservation : la bille conserve le mouvement de la personne même lorsqu'elle n'est plus en contact avec elle. De ce fait (et en l'absence de frottements dus à l'air), elle tombe à ses pieds.

La séquence présentée est conçue en référence à cette difficulté. Elle a pour but d'aider les élèves à rompre avec l'idée d'un lien causal entre contact et mouvement pour approcher celle de conservation (c'est le changement conceptuel proposé par l'auteure). Le raisonnement présenté ci-dessus est très proche de celui mis en scène par Galilée dans la deuxième journée de son *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* sous la forme d'un dialogue fictif entre deux personnages (Salviati et Simplicio) et visant à prouver que l'on ne peut rien déduire concernant la rotation de la terre autour du soleil en comparant – sans faire l'expérience – la chute d'une pierre du haut d'une tour et du haut du mât d'un navire en mouvement. Cet extrait a donc servi de base⁵ à la séance construite. Elle s'appuie sur trois hypothèses : 1) l'identification des élèves au personnage de Simplicio, 2) la reconnaissance par les élèves de l'équivalence (pour la chute) du mouvement de la Terre avec celle du navire (on néglige ici les effets d'entraînement et de Coriolis), 3) la construction (par les élèves ayant accepté cette équivalence) du principe de conservation. Ce sont les hypothèses de l'ingénierie didactique qui ont été vérifiées (à l'aide d'indicateurs) dans l'analyse *a posteriori*.

La première étape de la séquence consiste à faire prévoir le lieu de chute d'une pierre lâchée d'une part du haut d'une tour, d'autre part du haut du mât d'un navire avançant à vitesse constante. L'étape 2 vise à faire admettre aux élèves l'équivalence des deux chutes de façon à les conduire vers une conclusion incongrue sous-tendue par le raisonnement suivant : si les chutes sont équivalentes, alors la pierre lâchée depuis la tour devrait tomber derrière cette dernière, ce qui n'est pas le cas, la Terre est donc immobile. Nous

5. Les objectifs de Galilée et de l'auteure de la séquence ne sont donc pas exactement les mêmes, étant donné qu'on suppose, qu'à leur actuelle, tous les élèves savent que la Terre tourne (autour du soleil et sur elle-même) et que les objets tombent « tout droit » si l'on les lâche du haut d'une tour. Le problème ici n'est donc plus celui de la rotation de la Terre mais bien celui de la conservation du mouvement de la pierre et donc, de l'endroit où va tomber la pierre, dans le deuxième cas, si l'on admet la similitude des deux situations : à côté ou non du mât du navire.

comptons sur l'effet produit par cette situation conflictuelle (les élèves de 15 ans savent que la Terre est en mouvement) pour que les élèves envisagent une nouvelle conclusion pour le lieu de chute de la pierre lâchée du haut du mât (étape 3) par un raisonnement proche du raisonnement attendu : la pierre conserve la vitesse du navire même lorsque le contact entre elle et le mât est rompu (étape 4).

L'efficacité de cette séquence d'apprentissage, évaluée dans le cadre de l'ingénierie didactique, repose donc sur l'acceptation par les élèves de l'équivalence⁶ de deux chutes : celle d'une pierre lâchée du haut d'une tour et celle d'une pierre lâchée du haut du mât d'un navire en mouvement rectiligne uniforme. La première phase de l'ingénierie montre que les élèves, de prime abord, n'acceptent pas cette équivalence et, en accord avec les conceptions erronées répertoriées sur le sujet, ils prédisent, en majorité, une chute de la pierre au pied de la tour mais derrière le mât (un accord avec la position de Simplicio présentée dans le *Dialogue*). L'équivalence des mouvements dans les deux cas n'est par contre pas spontanée et réclame une intervention de l'enseignant (pour la rendre explicite) mais ensuite la contradiction apportée par les deux discours différents au sujet des deux situations similaires leur apparaît claire (bien qu'improbable pour certains) et par conséquent, ils admettent que dans les deux cas la pierre *doit* tomber au pied. L'enseignant institutionnalise alors ce fait et demande aux élèves de construire une explication permettant de justifier cette prédiction. Ce qu'il feront en admettant la conservation par l'objet lâché de la vitesse de l'objet entraînant.

Note : La conception selon laquelle les deux objets ne tomberont pas de la même façon dans les deux cas (c.-à-d. à la verticale du point de lâcher) paraît très ancrée dans l'esprit des élèves au point qu'il leur est difficile de « croire » le contraire même après avoir constaté l'équivalence des deux situations. On pourrait être tenté de dire que cela est d'autant plus étonnant qu'ils ont sans doute tous déjà fait l'expérience du premier lâché (du haut d'une tour ou d'un quelconque autre lieu du même type, y compris de leur main ou d'une table) alors qu'il est très peu probable qu'ils aient fait celle du deuxième (lâcher un objet en étant dans un référentiel en mouvement rectiligne et uniforme du type bateau, train, voiture, etc.) et n'ont donc quasiment aucune référence sensible à ce sujet

6. En fait, ces deux chutes ne sont pas strictement équivalentes puisque dans un cas, on est dans un cas de mouvement de translation (le bateau) et dans l'autre, il s'agit d'une rotation (la Terre). Cependant, on fait la même approximation que lorsqu'on dit qu'un référentiel lié au sol est galiléen, on néglige la pseudo-force d'entraînement du référentiel.

qui puisse appuyer leur prévision erronée... Pourquoi cela leur paraît-il si difficilement « croyable » ? Tout vient du fait qu'ils se rendent compte, à ce moment là, qu'ils sont en permanence dans un référentiel en mouvement et que la différence qu'ils faisaient entre les deux situations, issue de leur expérience, n'existe pas en réalité. Or, on peut avancer que le mouvement de la Terre, bien qu'étant tout-à-fait évident pour ces élèves, ne fait absolument pas partie de leurs *expériences sensibles* du mouvement. En effet, les expériences de mouvements (de leur corps), répertoriées comme telles, quant à elles, proviennent en majorité d'une concordance des stimuli visuels et auriculo-vestibulaires⁷ (on laisse de côté les informations kinesthésiques⁸ qui ne prêtent pas à confusion en l'absence de maladie spécifique) et y sont donc majoritairement liés. Il est donc tout-à-fait « naturel » que la rotation de la Terre ne soit pas considérée comme un « déplacement comme les autres » voire, soit considéré comme un « non-déplacement ». On pourrait voir, ici, un effet du système d'inférences « bayésien » (voir la note page 25) qui rend invisible à la conscience (et donc au raisonnement de « premier niveau ») les phénomènes non perceptibles au travers des sens et qui permet de construire des modèles (à l'instar des *p-prims*) du monde de manière automatique et « à la volée ».

Il apparaît donc tout-à-fait important de favoriser le plus tôt possible des liens explicites entre les expériences vécues qui mettent en jeu des phénomènes physiques et les lois qui s'y rattachent, surtout lorsqu'on considère qu'ils sont « invisibles », comme cela est fait dans cette ingénierie au sujet de la rotation de la Terre. De ceci, nous pouvons prévoir que dans l'ingénierie que nous proposons au sujet de l'équilibre, une étape mettant en lumière le fait que tous les objets immobiles du quotidien sont en équilibre, pourrait se révéler indispensable pour que les étudiants aient conscience que ce concept recouvre une classe très étendue de situations courantes auxquelles ils n'ont en général pas accès de manière spontanée.

6.4 Conclusion

L'ingénierie didactique étant née dans les années 80, elle a évolué depuis et a vu son champs d'application dépasser celui des mathématiques. On l'a vu exploitée en particulier en éducation physique, à propos de l'éducation au développement durable ou encore en physique. Cependant, son domaine de prédilection reste celui des mathématiques et

7. Qui informent sur les accélérations subies par la tête.

8. Informations sur la position et donc le déplacement des articulations.

ce, au niveau du collège, du lycée ou du primaire. Son utilisation à l'université a aussi été testée depuis, mais ce changement de public (et surtout les savoirs en jeu à ce niveau) entraîne certaines adaptations (Artigue, 2002) sur lesquelles nous reviendrons dans l'analyse *a priori* au fur et à mesure de sa description. Cependant, même en considérant ces évolutions ou adaptations et les limites de son utilisation que des auteurs n'ont pas manqué de relever depuis sa création, nous considérons cette approche tout-à-fait indiquée dans notre cas, ne serait-ce que par le guidage méthodologique qu'elle fournit dans l'organisation d'une séquence et qui permet des reproductions à l'identique d'une même séquence de classe, en contrôlant de près certains paramètres, ou par le mode de validation interne proposé qui permet d'identifier précisément les ajustements nécessaires à l'obtention d'un comportement spécifique des étudiants.

Étude d'une ingénierie didactique

« équilibre et stabilité »

7.1 Introduction

Comme on l'a vu précédemment, l'ingénierie didactique se compose de plusieurs phases et dans celle que nous avons conçue, nous allons suivre le canevas suivant :

- L'analyse préalable
 - Une analyse de contenu
 - Une analyse de l'enseignement usuel et de ses effets
 - Une analyse du cadre théorique utilisé (en lien avec les objectifs spécifiques de la recherche)
 - Une analyse des conceptions des étudiants
 - Une analyse du champ des contraintes
- L'analyse *a priori*
- L'expérimentation
- L'analyse *a posteriori*

Nous nous sommes écarté quelque peu du cadre présenté dans le chapitre précédent en ajoutant au processus d'évaluation interne, un processus d'évaluation externe du type « pré-test/post-test » basé sur l'outil informatique présenté en annexe B.2, page 229. L'écart est cependant purement « conceptuel » étant donné que l'évaluation externe n'a aucune incidence sur le processus normal de déroulement de l'ingénierie (on notera tout au plus que l'on s'est interdit de proposer, dans cette ingénierie, des systèmes rigoureusement identiques à ceux utilisés dans notre test, ceci pour éviter bien évidemment tout type de phénomène d'apprentissage direct).

7.1.1 Les modèles expérimentaux

Afin de juger qualitativement et quantitativement les changements éventuels dans les conceptions des étudiants, nous avons utilisé deux schémas quasi-expérimentaux (quasi experimental design) différents, basés sur la réplication de la même ingénierie didactique sur deux semestres différents :

1. Deuxième semestre 2013 : Schéma pré-test/post-test avec groupe unique et analyse interne basée sur des enregistrements des séances et des traces écrites.
2. Premier semestre 2014 : Schéma pré-test/post-test avec deux groupes de contrôle (schéma expérimental hybride proche du schéma « Solomon à 4 groupes »).

Ces modèles sont décrits en détail en fin de chapitre dans la section 7.7.1.

7.2 Analyses préliminaires

7.2.1 Analyse de contenu

Dans la première partie de cette thèse figurent les principaux éléments de contenu concernant les concepts de système, d'équilibre et de stabilité. On rappelle que la définition du système étudié est importante, voir cruciale dans certains cas. Nous n'allons pas nous intéresser aux problèmes spécifiques de la définition d'un système (ses limites, les entrées, les sorties, les perturbations, etc.) de manière approfondie, mais on peut noter que c'est une problématique importante, qui peut-être source d'erreurs chez les étudiants¹ et qu'il conviendra donc de prendre en considération *a minima* dans la séquence de classe proposée.

On rappelle aussi que, face à un système quelconque dans une certaine position (dans l'espace d'état), il y a deux façons permettant de juger s'il est à l'équilibre, c'est-à-dire dans un état d'équilibre :

- Trouver le ou les points fixes des équations qui le décrivent (de manière explicite ou non)

1. On a pu le noter lors d'exercices particuliers proposés aux étudiants. Par exemple, on a constaté que lors d'un exercice visant à définir les entrées-sorties d'un système simple de type « réservoirs d'eau », la moitié des étudiants échouait

- Observer certaines grandeurs et moyennant la connaissance de la nature du système, de ses entrées et perturbations, vérifier si ces grandeurs varient ou non durant un *certain* temps

La première méthode, a été qualifiée de *disciplinaire* dans le chapitre introductif de cette partie et se décline donc dans tous les domaines (mécanique, chimie, thermique, etc.) par des critères calculatoires, des procédures, que les élèves maîtrisent relativement bien dans les exercices d'application pour lesquels ils ont été entraînés (voir la première partie, pour un examen des connaissances des étudiants sur ce thème). On rappelle que, par exemple, dans le test ² proposé dans le premier chapitre de la deuxième partie de ce manuscrit, sur un système mécanique comme le pendule pesant, on peut trouver des taux de réponses correctes de 100% dans le cas statique mais qui descend à 74% en cas de mouvement rectiligne et uniforme du support de l'axe et 64% en cas de mouvement accéléré de ce dernier (avec présence de pseudo-forces, ou forces d'inertie). Sur un système identique du point de vue du fonctionnement mécanique mais dont la forme générale est un peu éloignée du cas du pendule (une gouttière en arc demi-sphérique), les taux deviennent 100%, 65% et 43% pour les mêmes conditions.

La deuxième « méthode », appelée *évolutionniste*, met en évidence l'influence du temps dans la caractérisation de l'équilibre et son caractère stationnaire. Cette approche n'est utilisable que si l'on dispose d'enregistrements de certaines variables du système, d'une vidéo ou de photos datées de celui-ci. Cette manière de comprendre l'équilibre est peu présentée dans l'enseignement alors que, en plus de coïncider très exactement avec le concept mathématique de l'équilibre, elle est énoncée spontanément par beaucoup d'étudiants. Comme nous l'avons vu au début de cette partie (voir page 86), c'est cette méthode, qui permet de caractériser un état d'équilibre dans toutes les disciplines, que nous allons favoriser dans cette ingénierie didactique.

On rappelle aussi que la stabilité, de même que l'équilibre, peut se déduire du résultat de l'application d'un certain nombre de critères mathématiques généralement déclinés dans chaque discipline. De façon plus qualitative, la stabilité d'un équilibre est une caractéristique permettant de prédire l'évolution du système face à une *perturbation* ou un changement de la consigne (en entrée) lorsqu'il est dans cet état. La définition que nous allons utiliser dans la suite est celle citée dans la section 5.2, page 86.

2. Test de reconnaissance de l'état d'équilibre.

7.2.2 L'enseignement usuel et ses effets

Cet aspect a été abordé plus en détail dans la première partie, mais on peut en rappeler quelques grandes lignes.

Les occasions dans lesquelles les étudiants rencontrent les termes et concepts d'équilibre et de stabilité sont nombreuses. Les activités sportives, la technologie et les sciences physiques et chimiques sont les principaux domaines scolaires où l'on rencontre ces concepts avant l'enseignement supérieur (universités et écoles d'ingénieur) et ce, parfois dès l'école primaire, où l'on y fait référence de manière parfois très approximative. On remarque de plus, que ces concepts sont abordés dans la scolarité, en suivant un parcours presque historique qui malheureusement, ne permet pas d'en avoir une vision aussi générale qu'elle pourrait l'être, et conduit au contraire, à en renforcer le caractère morcelé (caractère déjà présent dans l'esprit des individus, pour des raisons liées aux processus cognitifs de compréhension du monde).

Quant aux connaissances académiques des étudiants du supérieur relatives à ces concepts, on remarque qu'elles sont assez peu opératoires en dehors des « cas d'école » et de manière générale, relativement approximatives.

7.2.3 Les cadres de référence liés au *changement conceptuel*

Le Changement Conceptuel

Notre travail se situe dans le cadre théorique constructiviste du *changement conceptuel*. Une première théorie de ce type a été proposée par Posner et ses collaborateurs (Posner, Strike, Hewson, & Gertzog, 1982) du côté de la didactique et par Susan Carey au début des années 80 dans le champ de la psychologie cognitive comme le relatent Moreira et Greca (2003, p.4) ou Tiberghien (2002, p.32). Le point de vue général de Posner et al. est un parallèle entre les changements individuels et les changements dans l'histoire des sciences selon une vision Kuhnienne (Kuhn, 1962) qui suppose un changement radical (*paradigm shift*) de système explicatif, l'un devant être abandonné au profit d'un autre permettant de résoudre tous les *problèmes* que le premier est incapable de résoudre. Pour mener à bien, ou à tout le moins amorcer, ce changement conceptuel, les auteurs proposent plusieurs conditions que l'ancienne et la nouvelle conception devraient respecter : que l'étudiant soit insatisfait par ses conceptions actuelles, que la nouvelle conception soit intelligible, plausible et qu'elle promette une utilisation fructueuse. Après quelques années et suite à des résultats mitigés de l'utilisation de cette première version

de leur théorie, Posner et Strike proposèrent quelques modifications visant à prendre en compte d'autres facteurs issus entre autres de l'idée d'*écologie conceptuelle* (Posner & Strike, 1992 cité par Novak, 2002, p.14). Malgré ces modifications, ce point de vue n'est pas partagé par l'ensemble de la communauté des chercheurs en didactique et la principale critique provient de l'aspect Kuhnien « remplacement d'une structure par une autre » qui apparaît très limité pour expliquer des changements conceptuels de formes variées (Tiberghien, 2002, p.32). Parmi les théories alternatives au changement conceptuel de Posner et al., Vosniadou et al. (Vosniadou et al., 2001) ont développé une théorie fondamentalement différente dans le sens qu'elle suppose l'existence de systèmes explicatifs bien organisés comme des « mini-théories » (ou *théories spécifiques*) qui seront révisées, lors du changement conceptuel, de manière lente par l'incorporation à cette structure, de nouveaux éléments issus du savoir scientifique accepté, et permettant d'atteindre un niveau d'organisation structurel plus cohérent avec cette vision scientifiquement acceptée. Le point commun de ces deux visions du changement conceptuel est qu'il est dépendant du domaine. D'autres courants du changement conceptuel ne font pas cette hypothèse, ni même celle d'une organisation bien structurée du système explicatif des individus qui apprennent. C'est le cas de l'approche « *p-prims* » de DiSessa (1993) qui considère les connaissances des novices comme des « morceaux de connaissance » (*cf.* Knowledge in Pieces) superficiels, sortes d'explications personnelles de la réalité physique basées sur des abstraction d'expériences et d'observations de phénomènes.

Dans ce courant du changement conceptuel, on peut citer aussi par exemple M. T. H. Chi, Feltovich, et Glaser (1981) (M. Chi, 1993 ; M. T. H. Chi, 2008) qui considèrent les changements dans des *catégories ontologiques* ou Municio Pozo et Gómez Crespo (1998) qui considèrent un « changement représentationnel » plutôt que conceptuel. Nous n'allons pas chercher spécifiquement à appuyer tel ou tel autre de ces points de vue (ou théories) sur la ou les structures qui organiseraient la pensée des étudiants, mais nous avons vu dans le deuxième chapitre que les investigations préliminaires sur les concepts d'équilibre et de stabilité que nous avons menées et celles de la littérature en didactique, au moins en mécanique, suggèrent que des structures du type *p-prims* ou *facets* plutôt qu'une théorie cohérente de ces concepts chez les étudiants après l'enseignement secondaire sont plus à même d'expliquer les comportements observés. Nous pouvons constater par exemple que l'utilisation de telle ou telle conception, détaillée dans la suite de ce chapitre, est par exemple sensible à la fois au changement de système étudié mais aussi à la configuration d'un même système ou encore au scénario de la situation dans laquelle les étudiants

sont confrontés à ce système. Ceci paraît difficilement conciliable avec l'utilisation d'un système de pensée bien organisé de type « mini-théorie » (on trouve une discussion de ces différences dans Tiberghien, 2002, p.33).

De même, nous n'allons pas considérer le changement conceptuel dans sa signification implicite d'un "remplacement d'une ancienne conception par une nouvelle", si ce n'est, à considérer qu'un changement d'organisation est un remplacement, mais ceci reviendrait à admettre que les anciennes conceptions disparaîtraient au profit des nouvelles, ce que les recherches en didactique n'ont jamais montré (Duit, 1999). Au contraire, on constate souvent une forte résistance au changement de ces conceptions erronées, et ce que l'on peut d'ors et déjà anticiper à propos des conceptions auxquelles on s'intéresse ici, c'est qu'elles seront difficiles à modifier. En effet, parmi les raisons qui feraient obstacle à un changement profond des conceptions des étudiants, qu'a listé Duit (1999), figure l'ancrage dans la vie quotidienne. Or, les expériences de physique quotidiennes dans lesquelles interviennent l'équilibre et/ou la stabilité sont nombreuses (que ce soit l'utilisation d'une balance ou de dispositifs qui y ressemblent, par exemple) aussi bien que les cas d'utilisation de ces termes dans le langage courant, à propos de domaines non scientifiques, par exemple, dans lesquels ces termes ont une signification à la fois proche car procédant d'une certaine analogie avec le domaine de la physique (comme *l'équilibre d'un compte bancaire*), et éloignée, car basée sur des analogies très locales qui ne rendent pas compte de toute l'étendue du concept (comme *l'équilibre d'un repas*)³.

Application à notre problématique

De ces différentes théories, nous allons retenir qu'un changement conceptuel peut être initié par un conflit cognitif ou socio-cognitif (Ausubel, 1969 ; Vygotsky, 1978), et c'est cette stratégie que nous allons mettre en œuvre dans notre ingénierie didactique. Il ne s'agit pas là, bien sûr, de la seule voie qui permettrait un changement conceptuel.

Pour amener les élèves de la classe à construire le concept voulu, en passant de leur conception propre (erronée ou incomplète) à une conception plus conforme au savoir établi, deux approches « conflictuelles » peuvent être utilisées :

3. Voir la liste des termes énoncés par les étudiants comme représentatifs de l'idée d'équilibre, issue des questionnaires informatiques et de l'article de Pedreros Martínez (2013) présentés au chapitre 4, page 67.

- Mettre les étudiants face à deux situations apparemment différentes qui appellent de manière spontanée l'application de deux raisonnements issus de deux conceptions incompatibles (du point de vue théorique), l'une étant conforme au savoir établi et l'autre non (c.-à-d. une conception erronée). Les amener ensuite à comprendre qu'il s'agit en fait de situations d'une même classe (par exemple conduisant à une formulation théorique identique) et que le raisonnement « conforme » permet de les expliquer toutes les deux, ce que ne permet pas le raisonnement issu de la conception erronée. Ceci qui va conduire à un conflit cognitif (Piaget, 1960) chez ceux-ci, facilitant un changement conceptuel visant à abandonner l'une des conceptions au profit de l'autre.
- Mettre les étudiants face à une situation qui peut permettre l'application d'au moins deux raisonnements correspondant à deux conceptions incompatibles (du point de vue théorique) non obligatoirement présentes chez le même individu et les amener « collectivement » à échanger leurs points de vue contradictoires (Buchs, Butera, Mugny, & Darnon, 2004) dans le but de provoquer un conflit, dit *socio-cognitif* (Vygotsky, 1978), menant vers un changement conceptuel chez les sujets.

Dans le cas qui nous intéresse ici, le raisonnement adéquate, cible, est connu des élèves (c.-à-d. la conception sous-jacente est présente dans leur esprit) ou, dit autrement, fait partie de leur « écologie conceptuelle » et il ne s'agit donc pas de faire acquérir une *nouvelle* connaissance aux élèves, mais plutôt d'étendre le domaine de validité d'une de leurs connaissances, de modifier leur réseau conceptuel, de le réorganiser (voir figure 7.1). Il s'agit donc d'une réorganisation des liens entre les différents concepts de l'écologie conceptuelle des étudiants et non d'une addition d'une nouvelle conception ou d'un changement global de structure.

La TCC : Théorie des Champs Conceptuels

Afin de rendre le changement conceptuel espéré plus intelligible, nous allons chercher à le modéliser plus finement, et si possible à en obtenir une représentation graphique. Pour cela, nous allons utiliser le cadre théorique de la Théorie des Champs Conceptuel (Vergnaud et al., 1978 ; Vergnaud, 1990) qui offre une vision des connaissances, basée sur les *processus*, sur l'« action » du sujet. C'est un cadre cognitiviste, bien adapté au traitement des problématiques d'apprentissage des compétences complexes comme celles que l'on trouve dans le domaine des sciences et des techniques. Bien qu'étant plus ancien, il offre aussi une vision didactique intéressante des récentes théories issues des

neurosciences cognitives comme celles développées à partir des années 2000 autour du *Dual Process Memory* (Sun, 1994).

Ce cadre donne une place centrale au concept de *schème*, qui est « l'organisation invariante de la conduite pour une classe de situations données » (Vergnaud, 1990, p.136), c'est-à-dire les éléments cognitifs qui permettent à l'action du sujet d'être opératoire. Les conceptions que nous avons relevés dans la première partie, entraînent les étudiants à raisonner d'une certaine manière face à un problème (ou dans situation donnée), en se focalisant sur des aspects de surface ou de proximité avec des problèmes ou des situations connues, rendant donc leur conduite *invariante* pour ces classes de situations (ou de problèmes). Il s'agit donc bien là de l'expression d'un *schème*. Mais à la différence de la classification que nous avons fait alors en terme de *clusters* de *facets* (Minstrell, 1982) ou que nous aurions pu faire en terme de *coordination classes* de *p-prims* (DiSessa, 2002), nous avons ici une modélisation plus dynamique, un processus, qui permet de prendre en compte les aspects *évolutifs*, *adaptatifs*, des connaissances (l'équivalent, en somme, des réorganisations qui ont lieu entre les *p-prims* au sein des classes de coordinations). Nous détaillerons les éléments que nous avons retenu de ce cadre, pour notre travail, au fur et à mesure de l'analyse des conceptions qui suit.

7.2.4 Analyse des conceptions

Nous avons mené plusieurs enquêtes, présentées dans la première partie, afin d'identifier les conceptions alternatives des étudiants et les raisonnements (erronés) qui pouvaient apparaître lors de la résolution de certains problèmes ou pour répondre à des questions de compréhension relatives à certaines classes de systèmes.

Peu d'autres travaux se sont intéressés à ces concepts, mais cependant, une enquête colombienne, menée auprès d'étudiants d'ingénierie (Tamayo, Canu, & Duque, 2012), a montré que dans certaines classes de situations, l'équilibre était complètement *assimilé* à la stabilité, ce que nous avons aussi pu vérifier. Ainsi, pour résumer, la notion d'équilibre pour l'élève est liée aux notions de stabilité, d'immobilité et d'instabilité comme pour le physicien, mais à la différence de ce dernier, nombre d'étudiants considèrent que la stabilité, par exemple, est indépendante de l'équilibre (or, on a vu dans les chapitres précédents que la stabilité est une caractéristique de l'équilibre) ou que les conditions d'existence d'un équilibre stable sont différentes de celles d'un équilibre instable (l'équi-

libre instable étant de ce fait vu comme une espèce de « sous équilibre »⁴).

Pour les étudiants de l'université ou des école d'ingénieur, on peut donc inférer l'existence de plusieurs conceptions de l'équilibre avant enseignement de l'automatique. Trois de ces conceptions, ou raisonnements, ont été identifiés (figure 7.1) dans les différentes études menées jusqu'alors et nommés :

- « Équilibre-immobile »
- « Équilibre-stable »
- « Équilibre-instable »

Si l'on adopte le vocabulaire de la TCC, on pourrait regrouper ces conceptions dans le même *schème*, dont la figure 7.1 tente une représentation (celui de stabilité y étant inclus).

Sur le plan supérieur RC 1 de la figure, se trouvent les invariants opératoires relatifs au concept d'équilibre, qui par le jeu du calcul relationnel, dans certaines situations identifiées, vont donner les règles d'action du plan inférieur. Les flèches qui symbolisent le calcul relationnel ne vont que dans un seul sens sur le schéma, mais il faut considérer que les invariants opératoires (plan supérieur du schéma) sont aussi le produit des sélections et intégrations des informations présentes dans les situations réelles. Il s'agit d'une vision très dynamique dans laquelle les interactions entre les *schèmes* et les situations sont continues et permettent donc au changement conceptuel de s'opérer.

Les règles d'actions, sont les éléments détectables, des preuves visibles de l'utilisation par le sujet de la structure conceptuelle. Ce modèle est directement issu des recherches présentées dans la première partie, centrées sur la mécanique classique, et, pour un autre domaine, comme celui de la chimie, rien ne permet de dire que le sujet va utiliser un réseau conceptuel identique (puisque l'on peut le considérer comme une *classe de coordination*, soit, un ensemble de *p-prims* reliées entre elles, ou un *cluster*, qui va donc dépendre du domaine considéré, comme on l'a vu dans la première partie). Tous ces raisonnements, sont utilisés par les élèves dans certaines situations précises, relevant pour eux de l'idée d'équilibre et sont souvent opérationnels et même « optimaux » (Brousseau, 1998) mais pour une classe très restreinte de situations.

Comme on l'a dit dans le paragraphe précédent, les concepts d'équilibre et de stabilité

4. Ceci étant par ailleurs tout à fait explicable par l'absence « naturelle » des équilibres instables.

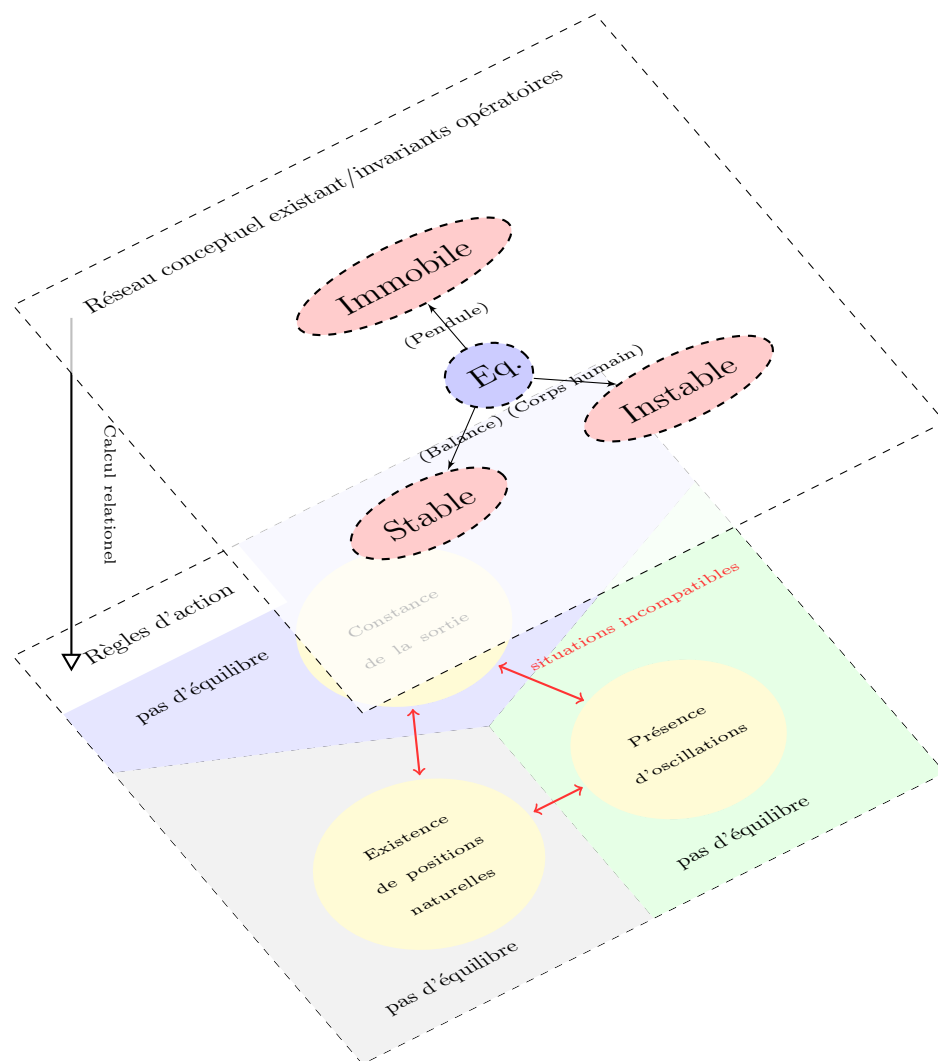


FIGURE 7.1 – Schématisation du changement conceptuel proposé pour le champ de la mécanique.

sont intimement liés (au niveau du savoir établi). Ils le sont aussi pour les élèves, mais d'une manière inadaptée. Nous n'allons pas ajouter d'éléments dans ce réseau conceptuel mais tenter d'amener les étudiants à modifier les liens qui unissent les éléments déjà existants.

Il faut bien comprendre ici que ces conceptions ne sont que rarement mises en évidence simultanément dans une situation. Le découpage disciplinaire des cursus traditionnels, par exemple, induit la construction chez les élèves de celles-ci sans qu'à aucun moment ils ne rencontrent de situations (bien identifiées) dans lesquelles toutes ces conceptions pourraient s'exprimer et entrer en concurrence ou se contredire (donc *idem* pour les raisonnements correspondant).

La conception équilibre-stable

La conception « équilibre-stable » est la plus étudiée. On peut en voir les conséquences dans les travaux de Gunstone (1987) ou de Ortiz et al. (2005). Elle pousse par exemple les étudiants à prédire un retour des systèmes étudiés dans une position généralement appelée « naturelle ». Le prototype de cette conception est fourni par la balance, pour laquelle la position d'équilibre horizontale est la seule qui semble devoir être prise en considération (dans un système du type masse-poulie comme celui proposé aux étudiants par Gunstone ou dans certaines expériences de Piaget, ce même raisonnement est à l'œuvre). C'est l'assimilation directe du caractère *stable* avec l'équilibre : les systèmes en équilibre sont ceux qui « cherchent » (ou dont on croit qu'ils vont « chercher ») à revenir dans leur position naturelle après une perturbation.

La conception équilibre-immobile

La conception *équilibre-immobile* que l'on peut rapprocher de *conceptions historiques* comme celle de Carnot, est aisément compréhensible : elle découle assez naturellement d'une conception de la force du type force-dépendant-de-la-vitesse (Viennot, 1979 ; Coelho, 2009) sans doute directement liée à « l'inexpérience » de l'état d'équilibre comme mouvement rectiligne et uniforme.

On peut inférer que cette conception soit mobilisée dans le cas des systèmes commandés et qu'elle conduise à identifier un équilibre avec une absence totale et globale de variation des grandeurs du système (dans un test pendule-sur-un-chariot, on observe qu'un étudiant sur cinq raisonne d'une telle façon). D'une part, en mécanique ce raisonnement

exclut les déplacements rectilignes et uniformes ou circulaires et uniformes qui sont pourtant des cas d'équilibre⁵. D'autre part, il empêche les étudiants de considérer tous les cas d'équilibre dynamique comme on peut en trouver en automatique (régulateur de watt, accéléromètre, etc.), en thermodynamique (transferts de chaleur) ou en chimie (transformations chimiques). Dans tous ces cas, en effet, on peut étudier un équilibre local du système, autour d'une position stationnaire (dans laquelle on peut par exemple considérer le système comme étant linéaire), un équilibre, mais cette possibilité n'apparaît que si l'on considère justement que l'équilibre statique n'est qu'un cas particulier d'équilibre dynamique (et pas un équilibre « complètement à part »).

La conception équilibre-instable

Cette conception est largement véhiculée dans le cadre extra-scolaire mais est aussi présente dans les disciplines scolaires liées aux activités sportives. Dans ce dernier cas, à aucun moment la nature du système étudié - le corps humain - ne fait l'objet d'un commentaire. Or, le corps humain, en tant que système mécanique, est un système complexe commandé. Aucun des éléments qui le constitue ne peut être considéré comme libre et des boucles de régulation sont présentes à plusieurs niveaux. Le système de régulation de plus haut niveau met en effet en œuvre le système vestibulo-oculaire (équilibre et vision) qui inclut une part importante de traitement inconscient et dont la partie vestibulaire se comporte comme un accéléromètre (complété par la partie visio-spatiale qui fournit une information sur la vitesse). Ceci implique qu'en général on interprète les informations reçues du corps en les associant à une terminologie erronée : « en équilibre » pour « équilibre stabilisé à la limite de la stabilité » par exemple.

Plus précisément, le corps humain est un système en équilibre instable en position verticale droite (debout) et il est stabilisé dans cette position (d'équilibre) par un système de régulation dont les muscles sont les effecteurs. La principale difficulté provient du fait que le capteur de l'équilibre est un accéléromètre et ne transmet donc aucune information lorsque le corps est en équilibre, ce qui, paradoxalement est en parfaite adéquation avec la définition mécanique de l'équilibre : l'information « vitesse » nulle n'est pas discriminée de l'information « vitesse constante » (c'est ce qui fait que, assis dans un train qui commence à partir, on pense immédiatement que c'est le train d'à côté qui se déplace car l'accélération n'est pas suffisante - et quasi constante - pour que le système vestibulaire

5. Tels que définis par nous.

informe le cerveau de son propre déplacement). Ceci implique donc que lorsque l'on demande aux élèves de « sentir » l'équilibre dans les activités sportives, on leur demande de se positionner de telle façon que la régulation de la position soit perceptible. C'est notamment le cas lorsqu'on se place debout sur un seul pied. L'inconvénient majeur de cette approche réside dans le fait que les élèves vont identifier cet état d'instabilité (en régulation) avec l'équilibre. Le problème n'est donc pas qu'ils identifient cet état comme un état d'équilibre puisque c'en est un, mais plutôt que cette conception va ensuite être étendue à d'autres cas tels que les objets longs et verticaux posés sur leur plus petite base ou tout autre objet mis dans un état à la limite de la stabilité et qu'un raisonnement dichotomique, binaire, par couple (Wallon, 1945) se produise : tout système similaire (du point de vue de la forme) est en équilibre et les autres non. On peut s'attendre à ce que cette conception soit très attachée au corps humain mais des exemples de transfert sur des objets tels que des petits morceaux de bois pour lesquels on cherche le centre de gravité en les plaçant au bord d'une table ont été constatés (dans ce cas les commentaires et les actions des étudiants vont dans le sens de « l'équilibre c'est quand le morceau est prêt à tomber, le centre de gravité est alors au bord »).

De même, cette conception qui est largement répandue dans le grand public a été observée, mise en scène, dans une exposition au *Museo de Arte del Banco de la República* de Bogotá⁶ en 2013. On pouvait y observer entre autre les œuvres des photos 7.2.

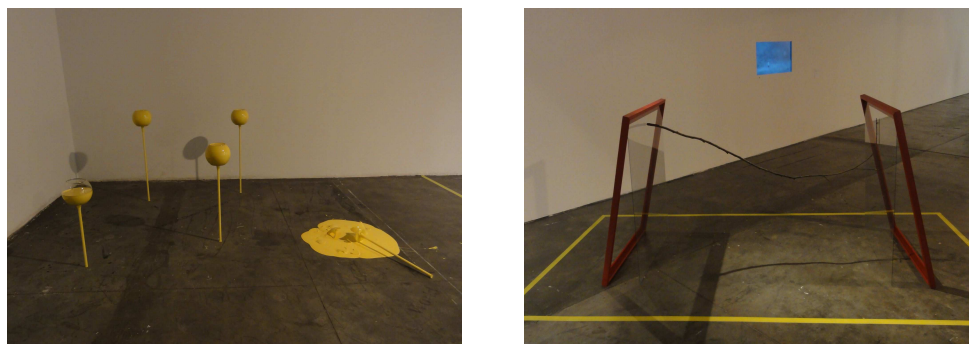


FIGURE 7.2 – Deux œuvres de l'exposition relative à l'équilibre

On peut remarquer que l'équilibre présenté est exclusivement celui de situations instables, c'est-à-dire qui symbolisent le fait que l'équilibre n'est « visible », perceptible, que dans des situations où l'on sent qu'à chaque instant tout peut changer, s'écrouler, se casser (avec l'idée additionnelle, ici, « d'irréversibilité », de précarité).

6. Colombie

7.2.5 Champ des contraintes

Pré-requis

Il n'y a finalement aucun réel pré-requis académique identifié pour cette activité. Seules les conceptions liées à l'équilibre et à la stabilité sont nécessaires puisque point de départ des débats. Ceci est généralement le cas même en l'absence d'étude préalable de ces concepts de manière académique, le langage courant, allié aux expériences quotidiennes, sont une source quasi universelle de connaissances même naïves sur ces sujets. Au niveau universitaire cependant, tous les élèves ont suivi au moins un cours de physique, de chimie ou basé sur la technologie dans lequel ces concepts ont été abordés (voir la première partie pour plus de détails). Une part des étudiants suit aussi une carrière d'ingénierie mécanique, on peut donc supposer qu'ils possèdent au moins les connaissances déclaratives et procédurales liées à ce domaine dont la statique fait partie, ce qui laisse supposer un avantage pour ceux-ci dans les situations présentées. Cet aspect sera analysé en organisant des groupes par filières et d'autres non.

Contraintes épistémologiques

Comme nous l'avons dit précédemment, il ne s'agit pas ici de faire découvrir aux étudiants les critères disciplinaires qu'ils connaissent déjà (ou non). Il s'agit de leur faire découvrir la signification générale de l'équilibre et de la stabilité, un savoir qui ne répond finalement pas à la résolution d'un problème précis – point déjà mentionné dans la partie historique, et par conséquent pour lequel il n'existe pas de situation fondamentale. On retrouve ici un aspect discuté dans le champ des mathématiques par (Dorier, 2000) au sujet de la structure d'espace vectoriel, qui comme pour l'équilibre et la stabilité vus du côté des mathématiques, a un caractère unificateur dont la nécessité ne s'est pas imposée parce qu'elle permettait de résoudre de nouveaux problèmes (mais plutôt de comprendre le lien entre plusieurs phénomènes). Il n'y a donc pas ici de situation (réelle) où la compréhension de ces concepts par une approche « évolutionniste », telle que nous la proposons, apparaîtrait comme optimale, au contraire de l'étude d'un critère disciplinaire.

Contraintes didactiques

Le temps que l'on peut raisonnablement passer sur ces concepts est estimé à, au maximum, deux fois une heure et demie, ce qui représente assez peu en regard des enjeux

visés, et a conduit à « scénariser » au maximum les séances et à baliser le cheminement conceptuel des étudiants, réduisant d'autant leurs possibilités d'action. Les stratégies d'action des étudiants par exemple seront prévues avant la séance et le choix des situations possibles pour mener à bien leurs réflexions n'est donc pas ouvert. Ceci fait que les interactions avec le milieu (hors enseignant) seront relativement limitées notamment pour valider le savoir en cours d'acquisition et, de plus, les phases d'institutionnalisation et de médiation de l'enseignant seront relativement présentes au cours de l'activité. On peut d'ailleurs considérer ces séances comme une suite de plusieurs activités, au sens de la théorie des situations, plutôt que comme une seule. En effet, il y aura alternance de plusieurs phases (voir 7.4) pour lesquelles on pourra considérer à chaque fois une médiation de l'enseignant, une phase de dévolution et d'institutionnalisation (Brousseau, 1998). Chaque médiation de l'enseignant va faire évoluer le milieu (didactique) et les possibilités d'interaction avec celui-ci. Il faudra donc veiller dans l'analyse à posteriori de bien différencier les évolutions du milieu venant des élèves (et donc révélatrices d'une avancée dans la construction des connaissances), de celles provoquées par l'enseignant (qui peuvent se résumer à des effets de contrat didactique).

Réflexions en groupe vs réflexions individuelles On va ménager une alternance de phase de travail en groupe et individuel, ceci pour favoriser l'engagement dans la tâche de manière individuelle et ensuite les interactions sociales propices à l'amorçage d'un changement (socio-) cognitif. Cela ne va pas sans poser certains problèmes, et notamment des problèmes d'organisation qui vont potentiellement entraîner des biais dans l'efficacité de l'activité. En effet, si, lors de la première phase individuelle, les étudiants s'engagent pleinement dans la tâche, lors de la phase collective, il n'est pas rare de voir des tentatives de « retour en arrière » individuels provoqués non pas par une évolution conceptuelle mais plutôt par une recherche du compromis proche d'un effet de contrat didactique (l'enseignant demandant explicitement un compromis). Pour cela, on va demander aux étudiants de mettre par écrit le résultat de leurs réflexions lors des phases individuelles et on va s'y référer (après les avoir collectées) lors des interactions avec le groupe, pour, si possible, demander aux étudiants des précisions quant à leur changement d'opinion, le cas échéant.

Engagement dans la tâche et aspects « motivationnels » Les étudiants qui ont participé à cette ingénierie sont peu habitués à ce type de tâche non calculatoires, d'apparence peu guidée et ont tendance à en minimiser l'apport, *a priori*. Ceci peut induire des difficultés à s'engager dans la tâche du fait d'un manque de motivation d'ordre extrinsèque (Reeve, 2012 ; Ryan & Deci, 2000). L'activité proposée ne ressemblant pas un cours « classique » les étudiants ne réalisent pas immédiatement le lien entre ce qui leur est demandé et les objectifs d'évaluation, par exemple (ce lien est en effet plus direct lorsqu'il s'agit d'effectuer des exercices du type de ceux qu'ils ont l'habitude de rencontrer dans les examens). Dans les enregistrements de l'ingénierie didactique on a d'ailleurs pu relever des commentaires, montrant que l'objectif de l'examen final pouvait orienter les questions posées par les étudiants (au détriment d'une réelle démarche de recherche de compréhension).

7.3 Analyse *a priori*

A l'instar de l'ingénierie didactique utilisée par de Hosson (2011b), nous présentons aux étudiants une situation qui rend possible l'expression de plusieurs⁷ raisonnements : le raisonnement correspondant au raisonnement cible, en adéquation avec une définition générale, a-disciplinaire, du type « état stationnaire » (ES) et certains autres considérés comme erronés (mais parfois opérationnels) comme ceux du paragraphe 7.2.3.

L'enseignant va s'attacher à faire exprimer aux élèves ces raisonnements, représentatifs de leurs conceptions sur des exemples choisis, afin de les rendre conscients. Il va ensuite guider les élèves afin de les amener à faire, d'une part, des rapprochements entre des situations similaires et, d'autre part, à prendre conscience des limites de leurs raisonnements préexistants. Ceci va les conduire à redéfinir le concept d'équilibre (et ensuite celui de stabilité), par palier, jusqu'à converger vers une définition proche de celle de l'automatique, énoncée dans la deuxième partie.

Si l'on reprend les éléments relatifs à la modélisation des *schèmes* relatifs aux conceptions, répertoriées et présentées dans le chapitre précédent, on aboutit à une modélisation du changement conceptuel cible, telle que l'on peut la voir représentée sur la partie droite de la figure 7.3.

7. Au moins deux.

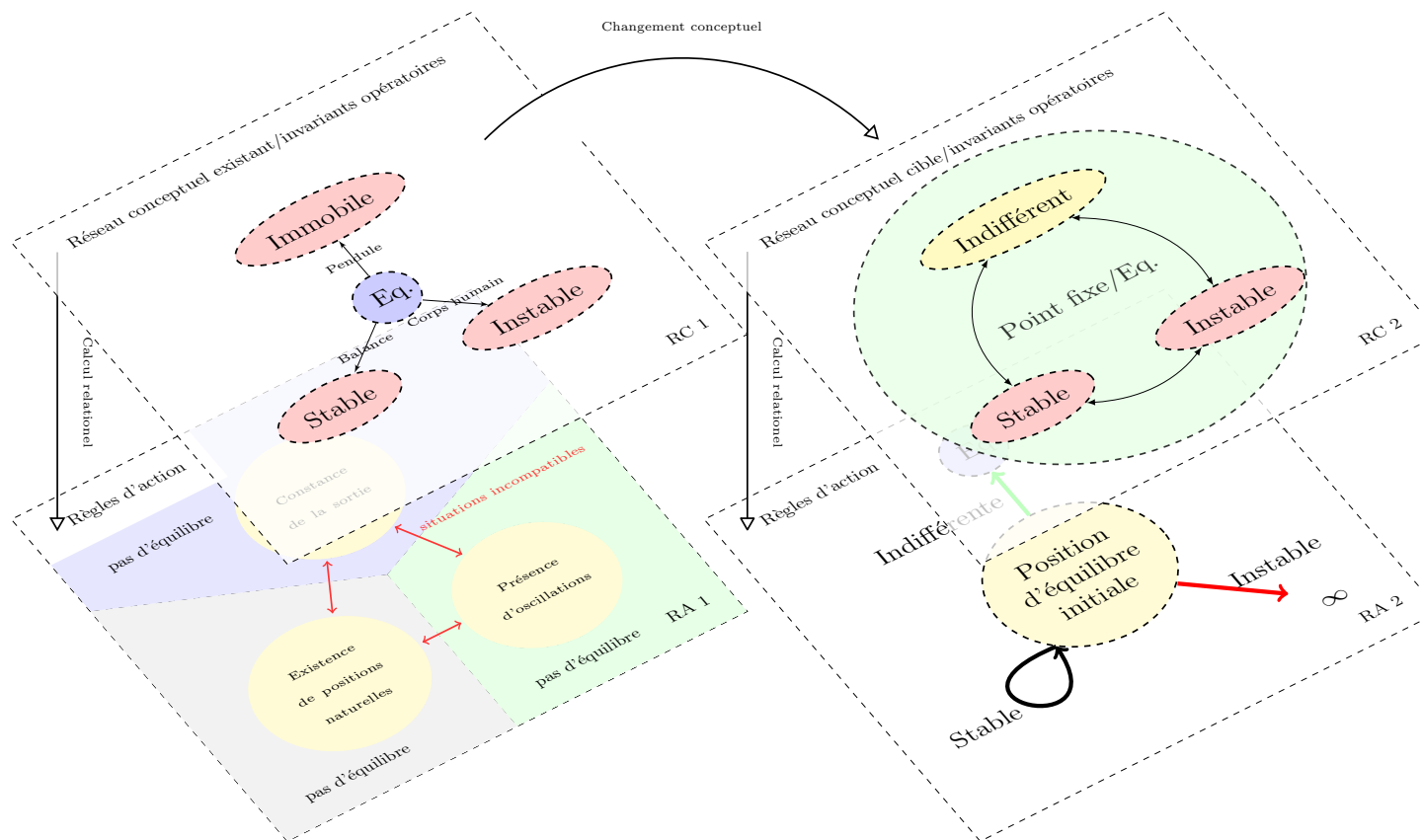


FIGURE 7.3 – Schématisation du changement conceptuel proposé pour le champ de la mécanique.

7.3.1 La séquence

Le fil conducteur de la séquence est une présentation d'un ensemble de systèmes à la fois connus et inconnus⁸ des étudiants, commandés ou libres, ayant en commun d'être tous dans un état d'équilibre. A l'intérieur de l'ingénierie proprement dite, Les étudiants seront amenés à définir la notion de système au sens large (Von Bertalanffy, 1969, p.12) ainsi que celle d'équilibre et de stabilité en alternant des phases de réflexion individuelle (1 et 3) dans lesquelles leurs conceptions peuvent s'exprimer librement et des phases de réflexion collective (2 et 4) dans lesquelles ils vont confronter leurs points de vue, permettant en cela l'évolution de leurs conceptions à l'aide des interactions entre pairs (c.-à-d., un conflit cognitif, Doise & Mugny, 1981 ; Vygotsky, 1978).

La séquence entière comporte deux parties, comme illustré par la figure 7.4, une pour l'équilibre et l'autre pour la stabilité, étant entendu qu'un certain « mélange » est autorisé, au moins dans les premiers temps de la partie relative à l'équilibre, le temps que les étudiants se rendent compte de ce qu'il y a de différent entre les deux concepts. Chacune des deux parties est basée sur le même schéma d'alternance *phase de réflexion individuelle* - *phase de réflexion en groupe*.

Le déroulement de la séquence s'appuie sur les documents (sur lesquels les étudiants répondent directement aux questions posées tout au long de la séquence) présentés en annexe, page 207.

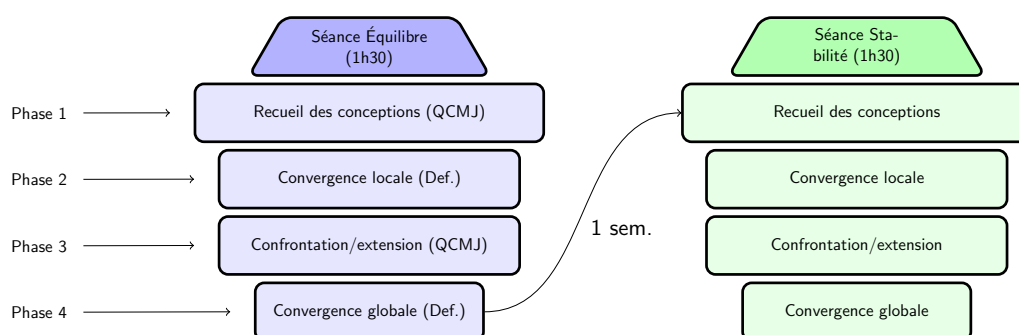


FIGURE 7.4 – Schématisation de la séquence d'ingénierie didactique proposée.

8. De manière académique.

7.3.2 Les variables didactiques

Nous avons décidé de placer les étudiants dans une situation où il n'y a pas, à proprement parler, de problème à résoudre. Cependant, ils vont être placés dans des situations dans lesquelles ils devront, pour avancer et répondre aux questions posées, définir précisément et correctement les concepts d'équilibre et de stabilité, afin que ces définitions s'accordent à la fois avec le savoir établi et avec l'évolution des systèmes présentés. On ne peut pas parler, ici, de situation a-didactique au sens défini au début de ce chapitre. Les étudiants connaissent en effet les concepts visés (même de manière imparfaite) et savent qu'il en est question dans cette activité. Comme on l'a vu dans les chapitres précédents, les élèves possèdent des définitions pour ces concepts et des conceptions qu'il va s'agir de faire changer, en proposant de modifier les limites et les conditions d'application de ces conceptions.

La variable didactique prépondérante ici, est celle liée au choix des situations présentées aux étudiants, qui sera détaillée dans la section suivante.

7.3.3 Les situations

On propose aux étudiants deux systèmes dans le premier temps, l'un que l'on peut considérer comme académique et l'autre dans le champs de la vie quotidienne : une balance classique (à fléaux et plateaux égaux, comme celles de l'antiquité grec, voir figure 7.5) et un corps humain (un, debout sur ses deux pieds et l'autre sur un seul, voir figure 7.6). On propose ensuite, dans le second temps de la séance, un pendule sur un chariot du même type que celui utilisé dans la première partie de ce manuscrit (figure 7.7).

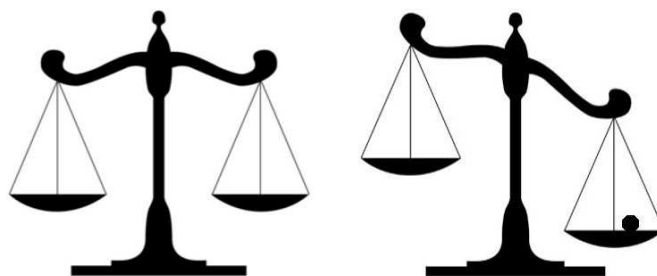


FIGURE 7.5 – Situations dites « balances »

Toutes ces situations représentent des situations d'équilibre.



FIGURE 7.6 – Situations dite « personnages »

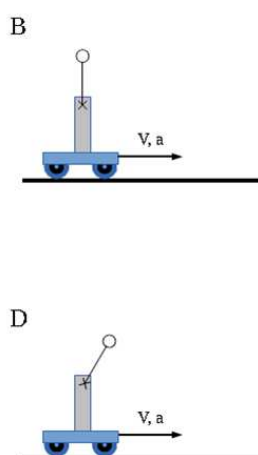


FIGURE 7.7 – Situations dite « pendules »

On pourrait être surpris par le choix de la présentation des systèmes dans une activité prévue pour des groupes assez restreints : sur photo et non pas un travail sur des dispositifs réels. On renvoie le lecteur vers l'étude préliminaire de la première partie pour une justification détaillée de ce choix, présidé par le même souci de ne pas introduire dans les réflexions des étudiants, des éléments complètement issus de l'expérience et difficiles à modéliser (comme les frottements par exemple) ou à réaliser (comme un mouvement parfaitement uniforme). On peut, ici, amener les étudiants à raisonner sur des cas à la fois d'apparence réelle mais dont on peut supposer le comportement suffisamment proche que l'on veut d'un modèle. Dans le cas de la personne en équilibre sur une jambe, par exemple, on peut légitimement penser que cela ne va pas induire une représentation particulière, par exemple de type équilibre-instable, et donc laisser les étudiants imaginer le comportement du système tel qu'ils le conçoivent (avec le risque que la conception équilibre-instable ne soit pas retrouvée avec autant de force que pour le cas réel de quelqu'un en équilibre sur un pied, justement du fait du caractère statique de la situation

présentée). Une expérience réelle – un livre posé sur une table – sera néanmoins proposée à la fin de l'ingénierie, sa réalisation n'impliquant aucun problème de compréhension supplémentaire.

Critères de choix des situations Nous avons choisi un premier système libre très « classique », la balance, pour faciliter les conflits cognitifs (les étudiants ont, en effet la sensation, trompeuse, de bien la connaître) ; le second, commandé, très courant mais peu étudié sous cet angle⁹, le corps humain, dont l'aspect commandé n'est justement pas si intuitif et dont le lien avec le pendule inversé peut être très productif ; et un dernier système, académique, le pendule sur un chariot, pour les possibilités de confrontation qu'il permet entre équilibre instable et mouvement (voir première partie). On peut donc prévoir d'utiliser le double regroupement (balance, corps humain) et (corps humain, pendule sur un chariot) pour mettre en évidence l'aspect immobile et commandé, respectivement. Quant au dernier système (le livre posé sur une table), il s'agit d'un système simple permettant d'illustrer l'équilibre indifférent, c'est-à-dire, ni stable ni instable.

7.3.4 Description de la séquence

Voici le descriptif des séances conformément au diagramme 7.4.

Équilibre, première phase

La première question qui va démarrer la séquence de l'ingénierie didactique proprement dite demandera aux étudiants de se prononcer sur l'équilibre des deux premiers systèmes, la balance et le corps humain. A partir de l'examen des positions¹⁰ proposées, les étudiants doivent dire si chacune d'elle est une position d'équilibre et justifier leur réponse, sans que l'enseignant ne précise le terme « équilibre ». Le choix des situations proposées et les interventions de l'enseignant doivent conduire à des regroupements, (dans le plan RA 1 de la figure 7.3) entre des situations ordinairement traitées indépendamment les unes des autres. On s'attend bien évidemment à certaines réponses sensées être représentatives de conceptions déjà identifiées. On peut s'attendre en particulier à ce que dans la situation « balances », 80% des étudiants n'identifie pas la position

9. Ce système est très étudié au niveau de la recherche en robotique, par exemple.

10. Au sens large, dans l'espace d'état du système, cela peut être un n-uplet de variables.

inclinée comme une position d'équilibre et que presque 100% des étudiants identifie la position horizontale comme une position d'équilibre (idée d'*équilibre-stable*). De même pour la situation « personnages », on peut s'attendre à ce que presque 100% des étudiants identifie la position « sur une jambe » comme une position d'équilibre et que 80% n'identifie pas l'autre situation comme une situation d'équilibre (idée d'*équilibre-instable* et d'invisibilité des situations d'équilibre statique courantes).

La première hypothèse que l'on va faire dans cette ingénierie didactique est que l'on aura une répartition des étudiants dans la classe, sensiblement identique à la répartition donnée ci-dessus (une répartition que l'on pourrait qualifier de « standard »).

Si on observe une répartition des raisonnements ou des conceptions des étudiants de la classe proche de celle qui est attendue, alors on pourra valider cette première hypothèse. Il ne s'agit pas à proprement parler d'une hypothèse d'ingénierie didactique au sens de celui défini dans la partie précédente. Il n'y a en effet aucune action « volontaire »¹¹ du sujet attendue dans cette phase qui serait le résultat d'une interaction avec le milieu. Il s'agit plutôt d'une vérification initiale que les étudiants possèdent des conceptions relatives à ces notions et qu'elles sont représentatives de certains modes de raisonnement identifiés, ce qui justifie finalement l'action didactique entreprise. C'est pourquoi nous allons la noter VF1E comme *vérification 1, équilibre*, et garder la lettre H pour les hypothèses au sens de l'ingénierie didactique proprement dite.

Il est cependant important de faire cette vérification initiale afin d'adapter l'organisation du travail en groupe le cas échéant par exemple en composant des groupes réellement hétérogènes ou en insistant sur un aspect plutôt qu'un autre en fonction de la présence ou non de certains termes dans cette première phase (comme le mot *stable* par exemple). L'action de l'enseignant va ensuite consister, à la fin de la première phase, à provoquer un débat de classe autour de ces situations en énonçant que ces quatre situations représentent des situations d'équilibre pour les systèmes considérés, ce qui normalement ne doit pas apparaître comme un fait évident pour tous – cf point ci-dessus – et donc susciter des interrogations individuelles (comme une *perturbation conceptuelle*, Zimmermann-Asta, 1997) qui vont être mis en commun avec les autres membres du groupe dans la phase suivante.

On peut considérer que c'est ici que la *dévolution* intervient et que c'est à partir de ce moment que l'enseignant va s'effacer (tout en restant relativement présent dans les inter-

11. Dans le sens d'une action qui résulterait d'un choix délibéré - conscient - entre plusieurs options disponibles

actions de groupe, suscitant les questionnements, favorisant les échanges ou débloquent une communication au « point mort »).

Équilibre, deuxième phase

Dans cette seconde phase, intervient la première hypothèse H1E, concernant la convergence vers l'idée *d'équilibre-immobile*. Le calcul relationnel (voir figure 7.1) provoque dans un premier temps le regroupement des situations rencontrées par les étudiants en différentes classes de situations qui sont mutuellement exclusives (dans la première phase individuelle). Nous faisons l'hypothèse que l'enseignant peut amener les étudiants à en rassembler certaines (celles précitées) dans une seule classe de situations moyennant une redéfinition de l'équilibre, temporaire, conforme à une vision *équilibre-immobile* : « un objet en équilibre est *globalement* immobile ». L'enseignant va donc proposer aux étudiants de réfléchir en groupe, chaque étudiant devant expliquer aux autres ses choix et donc exprimer des éléments caractéristique de sa conception de l'équilibre qui l'on conduit à répondre de telle ou telle autre façon et les confronter à ceux des autres. La consigne étant d'arriver à un consensus dans le groupe quand à une définition de l'équilibre permettant d'expliquer toutes les situations proposées sans faire de calcul. Cette définition ne sera bien sûr pas en totale adéquation avec la physique mais, d'une part, ce n'est qu'une restriction de la définition générale du concept – elle n'est donc pas *stricto sensu* erronée – et d'autre part, elle peut permettre de faire évoluer les conceptions des élèves de manière temporaire autour d'un consensus. Ce qui compte ici, c'est de s'affranchir du découpage qui fait appel à une caractéristique supplémentaire de l'équilibre inutile ici sur laquelle on reviendra par la suite : la stabilité ou l'instabilité (ou le caractère oscillatoire) et d'introduire la notion de perturbation – une action extérieure – et de conservation de la position au cours du temps. Pour inciter à utiliser cet aspect « évolutionniste », on va leur demander de proposer une expérience concrète permettant de vérifier cela sur un système quelconque.

L'indicateur correspondant à l'hypothèse H1, I1E, correspond à la formation par les élèves d'une définition du type « si le système ne bouge pas au cours du temps en l'absence de perturbations extérieures, alors il est en équilibre » dans laquelle on pourra identifier sans ambiguïté les termes relatifs à l'*immobilité*, aux *perturbations*, ainsi qu'au *temps*.

On voit bien ici que le rôle de l'enseignant est primordial mais en même temps ne doit pas être prépondérant : il ne s'agit pas ici que l'enseignant prenne à sa charge la résolution du

problème dévolu aux étudiants et que ce soit lui qui fasse évoluer le *milieu* dans le sens voulu par ses interventions. Cependant, les contraintes évoquées plus haut, font qu'il ne peut laisser les étudiants se fourvoyer trop longtemps, et arriver à une définition bien trop éloignée de la définition que l'on souhaite et qui correspond au chemin conceptuel prévu. On voit bien ici que la frontière entre intervention et dévolution est extrêmement ténue.

Équilibre, troisième phase

La deuxième hypothèse H2E est que l'étude d'un troisième groupe de systèmes (voir figure 7.7) incluant des pendules inversés mobiles¹² (c'est-à-dire des systèmes pour lesquels on est obligé de définir précisément les variables auxquelles on s'intéresse parce qu'il y en a plusieurs) va permettre de faire évoluer encore les conceptions des étudiants vers une définition encore plus large, encore plus proche de la définition cible de l'équilibre vu comme un état stationnaire, non réduit à celui de l'immobilité. Nous allons découper cette hypothèse en deux : une vérification et une hypothèse. La première vérification que l'on va faire, VF2E, étant que les élèves se rendront compte de l'inefficacité de la définition qu'ils viennent de trouver, au moins pour une certaine classe d'objets en mouvement.

Pour cela, l'enseignant va proposer d'étudier le cas du pendule inversé sur un chariot à partir de deux schémas. L'un est compatible avec un mouvement uniforme du chariot par rapport au sol, et l'autre non. Ce type de situation est important pour mesurer l'importance de la définition du système auquel on s'intéresse. Comme on l'a vu dans la première partie, ce type de situation pose des problèmes très spécifiques et l'idée ici est aussi d'inciter à inclure, en plus du temps, les variables d'intérêt dans les réflexions conduites.

Les étudiants doivent dire, pour chaque cas, si le chariot *peut* être en équilibre, et si le pendule *peut* être en équilibre, en précisant tout ce qu'ils considèrent comme utile (ou nécessaire), en se servant de la définition précédemment trouvée et ce, de manière individuelle. Le premier indicateur de VF2E, est donc l'hétérogénéité des réponses des étudiants montrant les limitations de la définition statique trouvée en deuxième phase (qui découle du raisonnement suivant : si tous les étudiants possèdent une définition commune opérationnelle de l'équilibre, alors les réponses devraient être les mêmes pour tous). En fait, la définition précédente ne va pas donner, dans ces cas-là, un moyen de

12. Sur un chariot par exemple

trancher sans ambiguïté entre l'équilibre et autre chose, et, surtout pas sans faire des choix quant à ses conditions d'application (en fait, la formulation d'autres hypothèses et la prise en compte des limites de la définition précédente).

Équilibre, quatrième phase

C'est dans cette phase, que nous allons vérifier la deuxième hypothèse, H2E. Pour entamer le second débat de groupe, l'enseignant va s'appuyer sur le résultat du questionnaire individuel, mettant ainsi en évidence que les avis divergent notablement entre plusieurs élèves. Avant de lancer les réflexions de groupe, l'enseignant va tenter de faire émerger des débats (groupe classe) qu'il manque au moins une information pour appliquer la définition : le temps. Ensuite, afin de les aider dans leur tâche, il montre une autre planche de figures (voir figure page 215) où sont représentés les mêmes systèmes, mais après un certain temps (fini, par exemple de 5 minutes). On y observe des positions identiques (par rapport au chariot) en ce qui concerne le pendule mais avec un chariot dans une position différente (du fait d'une accélération non nulle, le chariot s'est en effet obligatoirement déplacé dans le second cas, pour le premier cas, c'est une possibilité qui est présentée mais le chariot aurait pu aussi bien être au repos par rapport au sol).

Le document support (voir chapitre B.1) indique que ces systèmes sont en équilibre sans donner plus de précisions. La consigne donnée aux étudiants est, tout d'abord, d'appliquer la définition trouvée précédemment en groupe, afin de caractériser l'état du système. Le but est qu'ils se rendent compte que cette définition ne s'applique pas ici aussi simplement que pour les premiers cas. On ne peut en effet plus traiter le système de façon globale, il faut définir des sous-systèmes et des variables que l'on va observer (notamment la position du pendule par rapport au chariot).

Il leur est donc demandé de trouver une nouvelle définition de l'équilibre compatible avec ces nouveaux cas à partir de la précédente. L'hypothèse H2E formulée ici, est qu'ils atteindront cet objectif en laissant de côté l'aspect « statique global » de la première définition trouvée, et en identifiant deux aspects importants que sont : la définition des contours du ou des systèmes et l'observation de variables particulières associées à ces systèmes. L'indicateur associé à cette hypothèse, I2E, est donc que la définition trouvée comprendra une délimitation du système et une indication des variables d'intérêt, soit les éléments d'une définition proche de notre définition cible de l'équilibre.

Stabilité, première phase

Dans cette étape, on re-présente aux élèves les trois systèmes étudiés précédemment (les 6 situations) en annonçant que l'on va les examiner du point de vue de la stabilité. Dans un premier temps, on demande individuellement aux étudiants de se prononcer sur chacun d'eux et de dire s'il sont stables ou non tout en justifiant leur réponse (et de remplir le formulaire correspondant)

On s'attend ici à ce que la stabilité de la balance en position horizontale (cas 1) ou inclinée (cas 2) ne fasse aucun doute comme pour celle du personnage masculin (cas 4). En revanche on attend une réponse négative aux cas 3, 5 et 6. L'instabilité des systèmes des cas 5 et 6 étant considérée comme une bonne réponse.

Comme pour la première phase de la première séance concernant l'équilibre, il s'agit ici d'une vérification, d'un recueil des conceptions des étudiants, visant à vérifier la nature de celles-ci et de les engager dans une tâche de réflexion de manière individuelle. Nous visons ici l'hétérogénéité des réponses, qui nous fournira un premier indicateur (VF1s) pour cette seconde partie de l'ingénierie.

Stabilité, deuxième phase

L'enseignant annonce alors que l'équilibre des systèmes des cas 1, 2, 3 et 4 est un équilibre stable alors que celui des cas 5 et 6 ne l'est pas si l'on s'en tient à la position du pendule par rapport au chariot, ou à la position du chariot par rapport au sol. Il leur est ensuite demandé de réfléchir par groupe à une définition non mathématique de la stabilité permettant d'englober tous ces systèmes et permettant de conclure correctement quand à la nature de leur équilibre. Ils doivent aussi proposer une expérience permettant de tester cette définition sur un système quelconque, ceci dans le but de guider les étudiants vers des définitions de type *a posteriori* applicables à un large spectre de systèmes. Les étudiants viennent en effet de carrières différentes, chimie, mécanique et électronique et on a donc intérêt à favoriser des réflexions interdisciplinaires.

On pourra, lors de cette phase de recherche, apporter des éléments pour faire avancer les groupes, rappeler que le temps peut avoir un rôle important dans cette définition ainsi que les actions extérieures (les *perturbations*) et les inciter à proposer aussi une définition claire de « instable ». De même, il est important de discuter de la nature du système « corps humain » en remarquant que c'est un système asservi (au contraire des 4 autres en l'absence de données supplémentaires) et qu'à ce titre son comportement est

particulier (par rapport aux systèmes libres). Ce qui fait que ce système *est* différent, est à discuter avec les étudiants, par exemple, en posant des questions sur le comportement de celui-ci face à des événements particuliers (perte de connaissance dans le cas du corps humain, vent, etc.).

La première hypothèse, H1s, dans cette seconde partie, est que les étudiants peuvent construire une première définition de la stabilité du type « évolutionniste » (et pas disciplinaire) en s'appuyant sur ces systèmes et les questions de l'enseignant (indices). L'indicateur correspondant, I1s, est la formation d'une définition se rapprochant de la formulation « si après une petite perturbation d'une durée finie de l'état d'équilibre du système, celui-ci revient dans son état d'origine sans action supplémentaire extérieure alors l'équilibre est dit stable ». Pour l'instabilité, on s'attend à une définition plus précise que « c'est le contraire de la stabilité » c'est-à-dire qu'il faut décrire dans les mêmes termes ce qu'il se passe face à une perturbation. En effet, la troisième phase, qui suit, vise à appliquer cette définition dans un cas très spécifique qui nécessite que les deux aspects soient explicités pour provoquer l'inadéquation « définition/comportement ».

Stabilité, troisième phase

Une fois le consensus établi dans le groupe à propos des définitions de stable et instable, on présente aux étudiants un système nouveau sur lequel il devront appliquer ces définitions. Il s'agit d'un cas « réel », c'est-à-dire présenté en direct dans la salle, celui d'un livre posé sur une table. L'enseignant propose alors d'appeler la position courante du livre, la *position de départ* ou position A et ensuite il le déplace en le poussant sur la table vers une autre position dite *position finale* ou position B. Il leur est ensuite demandé de se prononcer individuellement sur l'équilibre du livre pour chacune des deux positions et le caractère stable ou instable de ces positions (ainsi qu'une justification de ces réponses). On peut leur rappeler qu'il suffit d'appliquer la définition précédente pour conclure.

La deuxième hypothèse, H2s, de cette partie est que les étudiants, se rendant compte de l'inefficacité de la définition précédente pour expliquer ce nouveau cas d'équilibre, vont devoir préciser leurs définitions et aboutir à la définition cible, à la fois de l'équilibre stable et de l'équilibre instable, en précisant ce qu'il se passe pour le système lorsque la perturbation disparaît.

Dans cette étape, nous attendons la vérification que les étudiants vont rencontrer un problème pour appliquer la définition précédente parce qu'elle ne permet pas de caracté-

riser entièrement l'état d'équilibre du livre dans les deux positions. En effet, le système étant dans une position d'équilibre donnée, une faible action – une perturbation – sur celui-ci va modifier son état – sa position dans le plan de la table – mais à la fin de la perturbation, le système ne va, ni revenir à sa position initiale – *i.e.* avant la perturbation – ni continuer à s'en éloigner, mais va rester dans l'état où l'a laissé la perturbation. L'indicateur VF2s, est la formulation par les étudiants, de cette inadéquation entre leur définition et le comportement du système, formulation que nous retrouverons dans les questionnaires.

Stabilité, quatrième phase

On demande ensuite aux élèves de se regrouper pour réfléchir aux modifications à apporter à la définition précédente afin qu'elle permette d'englober ce cas-ci. Pour cela, on va les amener à réfléchir à une définition d'un équilibre stable, d'un équilibre instable et de l'existence potentielle d'un troisième type d'équilibre (pas de manière directe, bien sûr, mais en leur faisant remarquer qu'une partition de l'ensemble des systèmes en deux, n'est pas plus « naturelle » qu'en trois par exemple¹³). Ceci vise à contrecarrer un raisonnement qui conduit à un découpage des situations en deux catégories exclusives, ce qui est un mode de pensée relativement courant, que l'on pourrait rapprocher du stade de la *pensée binaire* (Wallon, 1945), et qui consiste à penser seulement certains phénomènes par couple, un des éléments du couple étant, par exemple, le contraire de l'autre dans le système de pensée du sujet (comme : *stable/instable*).

On s'attend ici à vérifier l'hypothèse H2s par la reformulation de la définition de l'équilibre instable et stable sous des formes proches de « pour un système en équilibre stable, après le déplacement de l'équilibre par une perturbation ou un changement de consigne d'une durée finie, celui-ci revient dans la position d'équilibre initiale. » et « pour un système en équilibre instable, après le déplacement de l'équilibre par une perturbation ou un changement de consigne d'une durée finie, celui-ci ne reviendra plus dans la position d'équilibre initiale et s'en écartera indéfiniment¹⁴. ». C'est l'indicateur I2s.

Cette séance se termine par une institutionnalisation, visant à récapituler les points vus précédemment et surtout les aspects relatifs à la différence équilibre/stabilité, à l'impor-

13. Le lien avec un découpage lié à des valeurs de racines d'un polynôme pourrait être proposé : négatives, nulles et positives.

14. On peut ici préciser que, dans le cas de systèmes réels, celui-ci ne peut bien entendu pas s'éloigner indéfiniment de l'équilibre, les contraintes physiques faisant qu'en général il atteint une limite (qui en général, ne fait pas partie du système tel que défini au départ).

tance du temps, de l'évolution du système vis-à-vis « d'évènements » et de sa définition (entrée, sorties, perturbations, domaine de validité).

7.4 Première expérimentation

7.4.1 Introduction

Nous avons procédé à deux sessions de cette ingénierie didactique dans une université colombienne privée située à Bogotá, au second semestre 2013 et au premier semestre 2014. L'enseignant en charge du cours et de l'animation de cette ingénierie est aussi le chercheur, adoptant ainsi la posture du chercheur-praticien (Sensevy, 1998). A chaque fois, nous avons proposé une évaluation de type pré-test/post-test dont l'analyse sera présentée à part de l'analyse *a posteriori*, dans la section 7.7, page 150. Dans les deux cas, le pré-test a été proposé au début du semestre (la première séance) et l'ingénierie didactique a été effectuée peu après. Le post-test a été proposé en milieu de semestre pour la première session et en fin de semestre lors de la deuxième session.

7.4.2 Matériel produit

Les documents distribués aux étudiants sont présentés en annexe B.1, page 207. Lors de la séance, une planche avec les photos des systèmes a aussi été projetée sur un écran pour supporter plus facilement les discussions communes.

7.4.3 Organisation pratique

Session du deuxième semestre 2013

La séquence s'est déroulée sur deux séances pour deux groupes d'une même section¹⁵ comptant 39 étudiants. D'abord, un groupe référencé « GC »¹⁶ de 12 étudiants répartis en trois sous-groupes selon leur spécialité : chimie (IQUI), mécanique (IMEC) et électronique (ILEC) et ensuite un groupe mixte référencé « GM » (avec des étudiants des mêmes spécialités mais mélangés) de 27 étudiants répartis en sept sous-groupes (GMx), qui sert de groupe témoin (ou contrôle) pour les comparaisons liées à la carrière (la

15. La section représente une portion d'une promotion d'étudiants qui suit les cours d'un même enseignant. Il y a entre 3 et 4 sections dans le cours d'automatique.

16. C pour « carrière ».

filière suivie). Le groupe GC a suivi la séance « équilibre » le vendredi 9 août 2013, et la séance « stabilité » le mercredi 14 août 2013. Le groupe GM a suivi la même ingénierie, le mercredi 21 août 2013 pour la première partie relative à l'équilibre, et le vendredi 23 août 2013 pour la séance relative à la stabilité.

Session du premier semestre 2014

La séquence d'ingénierie s'est déroulée sur deux séances en suivant exactement le même protocole. Comme pour la première expérience, nous avons divisé la section en groupes afin de faciliter l'organisation et la bonne marche de la séquence. Comme il y avait plus d'étudiants (54), nous avons fait trois groupes, référencés G1 (17 étudiants), G2 (18 étudiants) et G3 (19 étudiants) dans la suite. Les séances ont eu lieu la même semaine pour la partie « équilibre » : les lundi 27, mercredi 29 et vendredi 31 janvier 2014 respectivement pour les groupes G1, G2 et G3. Pour la partie « stabilité », les séances se sont déroulées la semaine suivante, respectivement les lundi 3, mercredi 5 et vendredi 6 février 2014.

7.4.4 « Historisation » des séances

Dans chaque groupe du second semestre 2013, il a été procédé à un enregistrement audio de trois groupes (donc de tous les sous-groupes pour le groupe « carrière » et trois choisis au hasard pour l'autre groupe). Tous les documents-réponses des étudiants ont été scannés à des fins d'archivage pour les deux sessions.

7.5 Analyse *a posteriori*

7.5.1 Introduction

Nous allons présenter ici en priorité les résultats de la première session, pour laquelle l'analyse interne a été privilégiée. Cependant, des éléments de la deuxième session seront fournis en complément le cas échéant mais uniquement à partir des traces écrites des étudiants puisqu'il n'y a pas eu d'enregistrement audio.

D'autre part, nous n'allons pas séparer l'analyse des deux groupes (carrière et mixte) mais présenter seulement les différences ponctuelles, le cas échéant. En effet, il n'existe

pas de lien statistiquement significatif¹⁷ dans les réponses au premier questionnaire individuel, par exemple, entre les étudiants de telle ou telle filière (carrière). Cependant, lorsque l'on compare les étudiants d'une même filière travaillant ensemble dans le même groupe, il apparaît une différence relativement significative¹⁸ entre ceux-ci en fonction du groupe : les meilleurs scores étant trouvés dans le groupe des « mécaniciens », les « électriciens » venant en deuxième position, puis les « chimistes ». Quoi qu'il en soit, étant donné le faible effectif de chaque groupe pour tous ces tests, cela ne nous permet de tirer aucune conclusion pertinente. Les arguments des étudiants sont par contre, eux, beaucoup plus intéressants et montrent que même si les « mécaniciens » obtiennent, en moyenne, un score plus important que les autres au premier questionnaire individuel, c'est à l'appui d'arguments révélateurs de la conception équilibre-stable ou équilibre-immobile (donc potentiellement incorrectes) comme : « Pas de perturbations, stable »¹⁹ ou « Ne bouge pas »²⁰.

Toutes les citations des dialogues sont données directement traduites en français (les transcriptions étant en espagnol). Lorsque c'est l'enseignant qui parle, l'indication [L'enseignant], apparaît en début de ligne.

7.5.2 Équilibre, première phase, premier questionnaire individuel

Résultats

Le premier examen individuel des situations par les étudiants nous permet une analyse des conceptions à propos de l'équilibre (pas de questionnement sur la stabilité de manière directe dans cette première étape). Comme prévu, la situation de la balance avec fléau horizontal n'a pas posé de problème aux étudiants avec un taux de réponse correcte de 91,7% pour le premier groupe (GC) et 96% pour le deuxième groupe (GM). On peut cependant noter que les arguments fournis pour appuyer ces bonnes réponses sont souvent erronés ou peu fondés : « La somme des forces est nulle » (en dessinant un schéma où elle ne l'est pas), « Pas d'influence de facteurs externes », « Les forces se compensent » ou bien « Pas de mouvement entre les forces ».

17. Les échantillons étant relativement faibles, nous avons utilisé un test exact de Fisher, qui donne un p égal à 0,24.

18. On trouve un p égal à 0,009 avec un test exact de Fisher.

19. José C.

20. Diego C.

Certains arguments paraissent valides, comme « La somme des moments est nulle » mais la réponse pour le deuxième cas permet de se rendre compte que l'argument proposé est en fait le résultat d'une application erronée du calcul de la somme vectorielle des moments des forces s'appliquant au système. En effet, pour le deuxième cas, celui de la balance avec un fléau incliné (un objet est présent dans un des deux plateaux), les résultats se répartissent comme suit : groupe GC, 67% de réponses correctes et groupe GM, 71% de réponses correctes.

Analyse

On remarque que plusieurs élèves qui justifient leurs réponses avec la somme des moments, en concluent que la balance inclinée n'est pas en équilibre (certains élèves pensent qu'elle est en mouvement du fait du poids de la masse qui est dans le plateau de droite) ce qui est une possibilité à ce niveau de l'activité puisque l'on ne dispose que de l'image d'un seul instant.

En ce qui concerne les cas des deux personnages, les résultats sont plutôt inattendus par rapport à nos hypothèses de départ. En effet, la situation de l'homme debout les deux pieds au sol ne semble pas poser de problème aux étudiants qui le classe tous dans la catégorie « système en équilibre » à 83% dans le groupe « carrières » (GC) et à 96% dans le groupe mixte (GM). Cependant, là encore, plusieurs élèves invoquent des arguments soit incorrects, soit inappropriés, pour parvenir à ces réponses correctes. Par exemple, pour certains, le seul fait que le « système » soit *symétrique* suffit à appuyer leurs dires, pour d'autres, le personnage « ne doit pas faire d'effort pour rester dans cette position »²¹ est une preuve de son équilibre. Quoi qu'il en soit, l'indicateur d'hétérogénéité des réponses VF1E, est validé sur la base des arguments proposés.

7.5.3 Équilibre, deuxième phase, première activité de groupe

Déroulement

Dans cette phase, nous avons d'une part les enregistrements audio des groupes d'étudiants et d'autre part, une trace écrite qui représente le bilan de leurs réflexions.

Après un examen rapide des questionnaires de la première phase, l'enseignant annonce que toutes les situations sont des situations d'équilibre et que les réponses données font état d'avis différents entre les membres d'un même groupe ; ceci pour justifier les débats

21. Julian M.

et les échanges à venir. Après quoi les élèves échangent leurs points de vue sur la question.

Certains étudiants demandent s'il est possible de donner une définition en terme énergétique par rapport au centre masse, etc... Il est important de dire que, puisque l'on ne possède aucune information chiffrée sur les systèmes présentés, il convient de trouver une définition suffisamment générale pour s'appliquer à des systèmes divers (pas seulement en mécanique) et ne faisant pas appel à ces informations. Cette intervention de l'enseignant permet de préciser un peu plus le type de définition que l'on cherche et permet de décentrer le problème du champs de la mécanique.

Si tous les groupes s'accordent rapidement sur une définition assez proche de celle que nous visions, le groupe des « mécaniciens » parvient lui, rapidement, à une définition qui contient les aspects principaux que nous voulions voir surgir : le temps et les perturbations. Pour reprendre les propres mots des étudiants de ce groupe, l'équilibre est défini de la façon suivante : « Un corps est en équilibre si, sans lui appliquer de force externe, il se maintient dans la même position durant un temps infini, sans être sujet à des perturbations. » (IMEC, 9 :20). Dans le groupe des « électriciens », après quelques échanges, il se dégage aussi un consensus autour de l'idée « Un système est en équilibre si sa position est invariante » (ILEC, 11 :40), sur la base des points communs relevés entre toutes les situations présentées.

Chez les « chimistes », avant même de lancer une première définition, les débats tournent autour de l'idée de mouvement mais sans dégager une formulation claire. Dans ces deux derniers groupes, l'aspect relatif aux actions extérieures sur le système est absent de la première définition donnée mais va surgir rapidement autour de la notion de stabilité, essentiellement par le biais de questionnements, de doutes :

— Donc il faudrait le [l'équilibre.] définir avec le mouvement ? Si quelque chose est stable, c'est nécessairement en équilibre ?

— Oui, je dirais que si c'est stable, cela veut dire que cela ne bouge d'aucune façon [...] Cela se compense et c'est équilibré. (IQUI, 11 :05)

Ou encore :

— Ce que je dirais ici, c'est que tous ces systèmes sont stables, non ? Parce que...ils ne changent pas de position...alors peut-être que tous les systèmes qui sont stables sont en équilibre. On peut dire que pas tous les systèmes qui sont en équilibre sont stables.

— Tout ce qui est stable est en équilibre ? (ILEC, 11 :23)

Comme on le constate, plusieurs étudiants font état de manière explicite, entre eux, de leur manque de distinction entre *équilibre* et *stabilité*, et, de plus dans quasiment tous les groupes, des étudiants se rejoignent sur la conception « équilibre-immobile ». Dans le premier groupe mixte (GM1), par exemple, on peut entendre « Oui, tous sont en équilibre parce qu'aucun ne bouge » (GM1,16 :13). Cependant, dans un autre groupe mixte (GM3), les élèves mélangent équilibre et stabilité sans même y prêter attention et entament une discussion sur les influences externes/internes sur le système. Ces derniers, s'accordent sur une définition qui fait état de l'isolement du système, mais dans le sens de « s'il y a des influence externes alors il n'y a pas d'équilibre » : « L'équilibre, c'est quand un système reste invariant dans le temps, considérant qu'il n'y a aucun facteur externe » (GM3, 35 :20).

Certains groupes vont un peu plus loin, en donnant une définition en terme de constance d'une variable d'intérêt ou d'invariance globale comme : « Un système en équilibre est celui qui reste invariant dans le temps pendant qu'aucun agent extérieur ne le perturbe » (GM4) ou encore « C'est un état dans lequel, en l'absence de perturbation, le système se maintient dans la même configuration [...] » (GM2). Ces définitions, bien qu'étant un peu plus générales que celles faisant intervenir la position (ou l'idée d'immobilité), demandent à être affinées. Elles seront donc conservées en l'état pour la phase suivante dans laquelle ces éléments seront discutés plus en détail (limites du système, quelles variables, action du milieu extérieur, etc.).

Analyse

Globalement, quasiment tous les groupes passent par une phase de discussion mêlant équilibre et stabilité, qui les conduit à discuter de l'effet des actions extérieures sur le système et qui réclame une régulation de la part de l'enseignant, ne serait-ce que pour rappeler que dans cette première partie, on ne s'intéresse pas à la stabilité. Ils s'accordent finalement en majorité sur une définition faisant ressortir le caractère « immobile » de l'équilibre à partir de l'observation des points communs des 4 situations présentées. C'était justement l'objectif de cette phase, ce qui valide donc l'indicateur correspondant I1E.

On remarque cependant deux faits non prévus initialement :

- Les systèmes/situations avec les personnages ne semblent poser aucun problème, ici

- Le lien entre la définition demandée et l'expérience est loin d'être clair

Concernant le premier point, la différenciation entre les deux personnages était attendue comme révélatrice de la conception « équilibre-instable », qui ici, n'apparaît donc pas. On peut penser que cette conception se ferait davantage sentir en cas de test réel, de demande de mise en position d'équilibre, comme cela se fait dans les activités sportives, et qu'ici, c'est le choix de présenter des photos qui a empêché la manifestation de cette conception. Cependant, on peut dire que cela n'est pas problématique dans la mesure où ce choix était aussi guidé par un souci de distinction et de mise en lumière des différences *systèmes libres/systèmes commandés*. Or, c'est dans la deuxième partie avec le chariot mobile, que l'on va pointer les différences de cette nature, entre ces systèmes. Pour cela on sera amené à revenir sur cette situation afin de questionner les élèves sur la nature du système « corps humain ».

Concernant le lien définition/expérience, il suffit d'une intervention de l'enseignant pour faire comprendre aux étudiants que l'on souhaite une expérience basée exactement sur la définition trouvée, et non l'exhibition d'un exemple comme beaucoup l'ont fait de manière spontanée. C'est un effet inattendu, qui permet cependant de travailler sur un aspect important permettant de relier une définition avec une expérience, en essayant de prendre en compte l'ensemble des aspects de la définition mais seulement ceux-ci (l'enseignant devant inviter les étudiants à vérifier un à un tous les éléments présentés : s'il est fait mention d'*invariance* dans le temps, par exemple, comment faire pour vérifier cela ?).

7.5.4 Équilibre, troisième phase, second questionnaire individuel

Résultats

Cette phase étant individuelle, nous allons détailler seulement les réponses présentes dans les questionnaires et vérifier que l'utilisation de la définition trouvée dans la phase précédente, n'est pas totalement opérationnelle en l'état.

L'enseignant prend quelques minutes pour répondre aux éventuelles questions des étudiants leur permettant de bien comprendre les situations : la tige du pendule est rigide, un dispositif permet d'appliquer une force au chariot pour le déplacer (moteur par exemple), le pendule peut tourner complètement autour de l'axe sans toucher le chariot, etc. Après quoi les étudiants complètent les questionnaires.

Après ramassage des questionnaires, on obtient, par exemple, les résultats du tableau

7.1 pour le groupe mixte.

TABLE 7.1 – Réponses aux questionnaire individuels de la phase 2 (n=26).

Cas	B (pendule)	D (pendule)	B (chariot)	D (chariot)
Oui	58%	58%	71%	75%
Non	42%	42%	29%	25%

Analyse

Ces résultats sont assez différents (entre les « oui » et les non), pour que l'on puisse les utiliser pour faire remarquer aux étudiants qu'il y a des avis partagés et valider l'indicateur VF2E.

L'intérêt n'est pas ici d'analyser les réponses par rapport au savoir final visé mais par rapport à la définition précédente (savoir intermédiaire). Rappelons qu'il y a deux « problèmes » ici : (1) pour tester la définition précédente qui fait intervenir l'idée d'invariance dans le temps, il manque une information temporelle, et (2) que l'on s'intéresse à la position du (*cf.* immobilité) du système ou à une autre variable, il faut faire des choix, le système ne pouvant se traiter dans sa globalité. L'idée principale, rappelons-le, est de faire constater aux étudiants que si l'utilisation de la définition trouvée précédemment ne permet pas d'identifier clairement quels sont les systèmes en équilibre, c'est qu'elle n'est pas opérationnelle.

On peut d'ailleurs relever dans les écrits des étudiants, que certains cherchent à utiliser des critères liés à la vitesse ou à l'accélération du chariot pour conclure, au lieu de raisonner à partir de la définition précédente comme : « Le chariot peut être en équilibre si et seulement si l'accélération est 0, c'est-à-dire à vitesse constante » (Laura M., IMEC). D'autres essayent d'utiliser ce qu'ils viennent de trouver comme : « Si la variable d'intérêt est l'accélération, et que celle-ci reste constante dans le temps, le système peut être considéré en équilibre [...] » (Sebastian M., IMEC). On remarque ici que la définition utilisée ne fait pas appel à la notion d'immobilité, le groupe dont est issu cet étudiant ayant rédigé sa définition directement en terme de « variable d'intérêt » comme cela a été évoqué dans le paragraphe précédent (on peut aussi remarquer, ici, que le système n'est pas précisé et donc que la prochaine étape est nécessaire dans ce cas pour préciser les choses).

On peut noter de plus, que, les étudiants étant rassemblés par « ilots » de tables, il se produit inévitablement un certain effet de « contamination » au sein d'un même groupe dans les réponses données. On ne peut éviter en effet, facilement, les uns et les autres de regarder les réponses du voisin, et l'hétérogénéité des réponses s'en ressent (certaines corrections de réponses peuvent donner quelques indices à ce propos).

7.5.5 Équilibre, quatrième phase, seconde activité de groupe

Déroulement

Après avoir demandé aux étudiants leur avis sur les raisons qui font que l'application de la définition trouvée ne fonctionne pas « telle quelle », on les laisse réfléchir un moment et échanger leurs points de vue (groupe classe), jusqu'à ce que le mot « temps » surgisse (la définition trouvée et l'expérience choisie y faisant clairement référence, cet aspect est assez rapidement identifié). On distribue alors une planche montrant les mêmes systèmes au bout d'un temps fini (présenté en annexe), et le quatrième formulaire où l'on demande (1) si la définition précédente permet bien d'englober ces nouveaux cas d'équilibre, (2) les raisons qui font que la définition précédente permet ou non cela et (3), le cas échéant, les modifications à apporter à la définition pour qu'elle englobe tous les cas présentés. Pour les groupes qui s'étaient accordés sur une définition basée sur l'immobilité, l'application de celle-ci à ce nouveau système doit conduire rapidement à la conclusion qu'elle n'était pas opérationnelle ici. Cependant, ce n'est pas le cas pour tous.

L'enseignant doit alors aider chaque groupe à bien penser à vérifier sa définition, avant de se lancer dans des discussions pouvant faire intervenir d'autres critères que ceux présents dans celle-ci (comme l'énergie).

On observe que dans tous les groupes, les discussions principales tournent autour de la définition d'un référentiel (donc indirectement, du choix de variables d'intérêt) et des perturbations. Dans le groupe des « mécaniciens », on peut par exemple observer l'évolution entre la confrontation des avis divergents juste après le questionnaire et la prise de conscience qui permet de s'accorder sur une formulation commune :

- J'ai mis qu'ils n'étaient pas en équilibre
- Aïe, j'ai mis que oui. J'ai mis qu'ils pouvaient être en équilibre si les deux étaient au repos ou si certains se déplaçaient à vitesse constante — Alors, il doit y avoir une accélération
- ça peut se faire...il ne peut pas avoir de vitesse...enfin oui...mais ça marche pas...celui-là devrait être accéléré

...

- Là, alors le pendule peut être en équilibre...il serait au repos
- Et s'ils demandent pour le chariot ?
- ça dépend du référentiel initial, si on le met sur le pendule, alors le chariot est en équilibre par rapport au pendule, si on le met sur le chariot, le pendule est en équilibre par rapport au chariot mais si on le met sur le sol, aucun n'est en équilibre
- Alors, l'équilibre dépend du référentiel
- Comme les mesures...Tout dépend du référentiel
- [...] (IMEC, 40 :48)

La question des perturbations vient généralement seulement ensuite.

Il faut cependant veiller à ce que les débats des étudiants conduisent à faire le point sur certaines conceptions erronées lorsqu'elles se présentent. On peut en effet voir surgir les idées liées aux déplacements (force = vitesse) ou aux changements de référentiels. Les débats dans le groupe doivent permettre de sortir de ces idées communes, comme ici :

- La définition proposée avant n'est pas correcte [...] on a dit "à moins que se présente une force externe qui le perturbe", **cette force se serait pas représentée par la vitesse ?**
- Non, premièrement le système n'est pas en équilibre puisque la vitesse va changer.
- Oui, je dirais ça aussi.
- Mais quand ...il y a une force externe, ce qu'il y a c'est une accélération. Et il se maintient avec la même accélération. Si c'est la même accélération, c'est toujours la même force.
- Donc ça c'est pas une perturbation, on avait dit que ça changerait pas d'état dans le temps à moins qu'il y ait quelque chose qui le perturbe.
- Une perturbation qui le sortirait de son équilibre [...]
- Pour le chariot ça peut arriver mais pour le pendule, non [...] (IQUI, 42 :22)

Pour certains groupes, la définition s'applique sans problème apparent, en particulier pour ceux qui ont une définition faisant déjà intervenir l'*état* ou une *variable d'intérêt* du système. Comme nous l'avons déjà fait remarquer, il est cependant important, lorsque c'est le cas, de les amener à réfléchir au sens exact de ces termes, pour qu'ils ne s'en servent pas comme de termes « fourre-tout » ou bien qu'ils restent avec une définition pas suffisamment explicite.

Ce fut le cas par exemple pour le groupe mixte GM3 : « L'équilibre c'est quand un système maintient ses propriétés durant un temps déterminé (position, température,

vitesse, etc.) ». En fait, ils ont commencé l'activité avec des avis divergents (attestés par le formulaire individuel) qui ont été formulés dans le groupe mais qui n'ont pas donné lieu à un vrai débat. Ils ont fini par conclure rapidement et « collectivement », que leur première définition était « parfaite » (GM3, 54 :50) et qu'il n'y avait pas à la modifier.

Analyse

Quelque soit le degré de précision de la définition trouvée dans la phase précédente, on remarque que les étudiants sont amenés à réfléchir au sens des termes employés et par conséquent, à préciser la signification de ce qui est appelé « le système » et « les perturbations ». Ceci est un point de passage obligé dans la démarche de définition mais l'agencement de la séquence, en fait aussi un point de passage « naturel » que les élèves rencontrent sans aide de l'enseignant, au cours de leurs échanges (dans la majorité des cas). C'était justement l'effet escompté qui valide l'indicateur de la deuxième hypothèse de notre ingénierie, I2E.

Il ne faut cependant pas laisser les doutes s'installer ou les questions ouvertes, sans proposer des éléments pour y répondre, le groupe n'ayant pas toujours les ressources disponibles pour y faire face de manière spontanée (généralement, par le seul biais de questions d'approfondissement bien choisies, ces éléments surgissent). L'exemple des perturbations est très représentatif : ce concept, qui peut paraître évident aux yeux des étudiants, suscite beaucoup de discussions. Il faut préciser que l'entrée d'un système commandé ne fait pas partie des perturbations pour éviter que les phrases souvent proposées par les étudiants comme « en l'absence de perturbation », ne se transforment pas en « en l'absence d'entrée sur le système ».

Au niveau technique, la situation présentée peut paraître « compliquée » ou « dure »²² de prime abord. Il faut donc prendre le temps de bien présenter la situation, par exemple insister sur la caractéristique rigide de la tige du pendule et sur le fait que le chariot est doté d'un dispositif lui permettant d'avancer (un moteur qui imprime un couple sur les roues, par exemple, ou une force directe sur celui-ci).

On peut déplorer un écueil majeur dans cette partie : Au niveau des débats de groupe, on remarque que lorsqu'il n'est pas possible de suivre chaque groupe (passer et poser des questions pour faire avancer le débat), tout repose seulement sur la motivation des étudiants et leur degré d'implication dans la tâche pour avancer dans la construction des définitions demandées. Dans le groupe de taille maximale, on remarque que malgré

22. Selon les termes utilisés par les étudiants eux-mêmes.

l'enregistrement (vite oublié), on ne peut garantir une implication pleine et entière de tous les membres d'un même sous-groupe, ce qui dans ce cas anéantit presque tout l'intérêt de l'activité pour ces étudiants-là.

7.5.6 Stabilité, première phase, premier questionnaire individuel

Résultats

Comme pour la partie relative à l'équilibre, cette première phase est individuelle et se déroule dans le silence. Seules les traces écrites permettent d'obtenir des informations. Les réponses sont relativement hétérogènes au sein d'un même groupe mais laissent apparaître des différences (ou régularités) si l'on compare l'ensemble des étudiants ou les groupes « carrière » ou « mixte » séparément. La situation de la balance, ne pose aucun problème lorsqu'elle est horizontale mais en cas d'inclinaison, elle semble non stable à 30% des étudiants du groupe mixte. La situation 4 (homme) fait quasiment l'unanimité (90-91%) mais le cas de la situation 3 (femme) pose problème à 16% du groupe carrière et 95% (!) du groupe mixte. Quant au cas du pendule inversé, 3/4 des étudiants considèrent le dernier cas (cas non inertiel) comme non stable et la moitié considère le cas 5 (cas inertiel) comme non stable. Nous ne pouvons néanmoins tirer aucune conclusions quant à la répartition globale, étant donnée la faible représentativité du groupe « carrière » (12 étudiants au total, soit 8,3% par étudiant), cependant, ces disparités valident l'indicateur VF1s.

Analyse

Plusieurs réponses des étudiants montrent encore certaines difficultés à manier l'approche « évolutionniste » proposée (ce qui paraissait assez prévisible après seulement une séance de travail sur ce sujet). Sur la figure 7.8, une réponse assez représentative de cet état de fait, qui laisse apparaître notamment une difficulté dans le fonctionnement de la prévision, en lien avec les actions sur le système.

L'explication du cas 1, laisse à penser que le système stable est celui qui va, en quelque sorte, résister à la perturbation et « demeurer » dans sa position d'équilibre (alors qu'il pourrait s'en écarter et y revenir ensuite, ce qui est la définition attendue). Dans la justification du cas 2, on peut lire que le système instable est celui qui va « sortir » de sa position d'équilibre devant une perturbation, sans qu'on sache ce qu'il se passe

2. Justifique su respuesta con el máximo de detalles:

Caso 1: Es un sistema estable debido a que el sistema ante cualquier perturbación tendera a permanecer en su posición de equilibrio
 Caso 2: Es un sistema inestable debido a que el sistema ante una pequeña perturbación saldra de su posición de equilibrio

FIGURE 7.8 – Premier questionnaire individuel « stabilité », Erwin P, Groupe Mixte.

après.

Ces considérations ont permis d'introduire des discussions, dans la deuxième phase, sur l'intensité de la perturbation (par exemple, faut-il la prendre en compte ? Le fait que la personne du cas 3 soit susceptible de tomber suite à un « coup »²³ qui lui serait donné et pas la personne du cas 4, apporte-t-il un argument en faveur de la stabilité du système ? Si, oui, lequel ?).

Dans le groupe « carrière », les avis sont plus homogènes mais l'analyse des justifications montre là aussi la non prise en compte des actions extérieures sur l'évolution du système pour définir la stabilité, qui semble alors identique à la définition « primaire » de l'équilibre : « le système se *maintient* dans la même position » (sans plus d'explications).

On observe ici que, même si l'équilibre a été traité dans la première partie par des considérations évolutionnistes, la stabilité ne l'est pas dans les mêmes termes, de manière automatique. De plus, la stabilité apparaît encore pour certains comme « indépendante » de l'équilibre : « Avec de petites perturbations, la stabilité se perd » (Laura M., GM) (alors que c'est l'équilibre qui est perdu) ou « [...] et récupérer sa stabilité, [...] » (Santiago R., GM) (idem).

On peut considérer que ceci justifie pleinement la poursuite de l'activité.

23. Terminologie employée par les élèves.

7.5.7 Stabilité, deuxième phase, première activité de groupe

Déroulement

Dans chaque groupe, les discussions débutent par une mise en commun des réponses aux questionnaires individuels (en général de 2 ou 3 étudiants sur un groupe de 4 ou 5). Dans le groupe des « mécaniciens », les discussions débutent sur le cas du personnage qui fait du yoga (cas 3). Dans ce groupe, en effet, les avis sont beaucoup plus partagés que dans les groupes des « chimistes » ou des « électriciens », sur quasiment tous les cas. La définition de certains faisant appel au terme « naturel », ce point fait débat dès le début :

- J'ai mis que stable c'était quand ça recevait une perturbation, ça revenait à s'équilibrer naturellement
- Naturellement[...] mais ce n'est pas parce que celui là est stable, celui-ci n'est pas comme ça
- Celui-là est stable ou non ?
- C'est stable ? [...] [question à l'enseignant]
- [L'enseignant] Oui, c'est stable
- Tu vois
- Ainsi ces deux là sont stables
- Alors non, ce que j'ai dit ne sert pas
- Mais pourquoi ceux-là sont stables ?
- Il y a un moment où elle peut se fatiguer dans la position, je penserais ça
- Bon, ça oui
- [...] (IMEC, 11 :25)

Dans un des groupes mixtes, les discussions tournent aussi autour du même cas 3 :

- Ce n'est pas stable parce que n'importe quelle variation les change, et ils retourneront à leur position où ils étaient, très difficilement
- Alors celui-ci aussi, à peine tu le touches et il tombe
- Mais il a dit que c'était stable[...] il faut savoir pourquoi [...]
- C'est comme s'il y avait un contrôle, entre eux
- Les personnes, parce qu'elles sont autonomes et celui-là parce que c'est une balance équilibrée, alors que celui-ci n'a pas de contrôle [...]
- [...] (GM3, 13 :43)

On observe que dans ce cas, les étudiants ont résolu le problème de différence de « nature » seuls. Dans le groupe des « mécaniciens », les discussions sur ce point, se sont

étendues plusieurs dizaines de minutes avant que l'intervention de l'enseignant ne fasse avancer le débat :

- [L'enseignant] Les 4 premiers systèmes sont de la même nature selon vous ?
 - A quoi vous faites référence ? Nature ?
 - [L'enseignant] Du point de vue du contrôle, il y a une différence entre la balance et le corps humain ?
 - Eh bien, le corps est articulé et il y a une force ici [...]
 - [L'enseignant] Par exemple, que se passe-t-il si la personne perd connaissance ?
 - [...]
 - Elle perd son contrôle
 - [L'enseignant] Oui, donc c'est un système ?
 - Un système plus variable ?
 - Instable ?
 - [L'enseignant] Non, non, c'est un système contrôlé et la balance, non. Il y a un système de régulation dans le corps, pour maintenir la position.
- (IMEC, 27 :00)

Les groupes passent ensuite à la rédaction de la définition, et pour ce faire, on les invite à réfléchir, en même temps, à l'expérience qui correspond. Faisant cela, la plupart passe par une phase de (re)définition de la perturbation, qu'il faut accompagner au besoin, comme dans ce passage :

- Une perturbation c'est ce qui sort de sa position d'équilibre le système
- [L'enseignant] Mais si par exemple, je mets la perturbation comme cela...et je ne veux pas que le système retourne à sa position...pour que fonctionne bien cette définition, il faut définir un peu plus précisément la définition
- Donc ce serait qu'elle sort le système de sa position d'équilibre...ce serait ça la perturbation
- Disons, il faut définir la position et c'est quelque chose qui affecte cette variable
- [L'enseignant] Oui, mais de manière permanente ? ou temporaire ?
- Temporaire
- [...] (IMEC, 40 :59)

Finalement, ils convergent après un peu plus de 40 minutes, vers une première définition de ce type : « La stabilité, c'est la capacité qu'a un système, de récupérer son état initial, en temps déterminé après avoir été perturbé, si les perturbations s'appliquent en un temps fini » (ILEC, 43 :05) ou encore « La stabilité, c'est quand un corps en équilibre

est perturbé instantanément [...] [pendant un instant] et de façon naturelle ou contrôlée, revient à sa position d'équilibre » (IMEC, 42 :10).

Analyse

Lorsque les débats de groupe débutent, il est indispensable d'aider les étudiants à se focaliser sur les questions soulevées par les réponses au questionnaire individuel : la non prise en compte des perturbations, l'influence de l'intensité de celles-ci (qui conduit à une discussion de la différence modèle/système réel) et la nature des systèmes (déjà examinée dans la première partie mais que l'on doit relier à la stabilité). Concernant ce dernier point, on observe que certains établissent une différence entre le fait, pour le système, de revenir à son état antérieur (d'équilibre) de façon « naturelle » ou non. Ceci a pour conséquence une différenciation de la stabilité en fonction du caractère libre ou non, du système. Il est donc important de veiller à ce que la terminologie employée quant à l'évolution du système d'un état à un autre : « naturelle », « de lui-même », etc. soit clarifiée.

Ceci peut renvoyer à un aspect théorique qui se traduit dans les conceptions des étudiants : le système de contrôle peut être apparent ou non, constitutif du système ou non. C'est un point discuté dans (Mayr, 1970) qui différencie les systèmes dont le contrôle peut être séparé physiquement du système complet des autres. Comme on l'a vu dans l'introduction, certains systèmes libres peuvent être modélisés comme des systèmes rétro-alimentés (la girouette par exemple) sans que l'on puisse physiquement séparer la partie relative à la régulation. Dans un des groupes mixtes, un des élèves explique ainsi « Je crois que c'est aussi pour une raison de contrôle...c'est-à-dire...on dit que la balance a un système de contrôle qui est le contrepoids[...] [text] » (GM3, 16 :21). On peut remarquer que dans ce cas, le pendule ne déclenche pas ce type de commentaire, sans doute, parce qu'il est rarement fait état des moments qui œuvrent pourtant dans ce cas-là, exactement comme dans le cas de la balance (voir l'étude de la balance en annexe, page 234).

Concernant la définition de la perturbation, cet aspect a été finalement éludé pour le cas de l'équilibre : les étudiants ont considéré la perturbation pour étudier le cas où elle est absente (pour juger de l'équilibre). Ici, il s'agit de lui donner corps, et notamment, de la définir en terme d'action et de durée. Cette étape est donc essentielle.

On peut globalement valider l'hypothèse de cette partie (indicateur I1s), les étudiants arrivant à formuler des définitions dans le sens de ce qui avait été prévu, et contenant

les précisions suffisantes pour avancer dans l'activité. On peut observer néanmoins, que l'enseignant prend une part plus importante dans les débats. Si l'on considère qu'il fait partie du milieu (didactique), ceci n'a rien de problématique. Cependant, il s'avère que son action, la rétro-alimentation qu'il fournit pour moduler l'activité des étudiants, soit ici indispensable et peut engendrer des disparités entre les groupes, entre ceux qui vont bénéficier de ce retour et les autres, du fait de sa disponibilité. Nous avons observé dans cette partie, que les étudiants livrés à eux-même, commencent à échanger parfois longuement sur des sujets sans rapport avec l'activité proposée, au détriment d'une réflexion en profondeur.

Ceci apparaît comme une limite majeure de cette activité qui, on le verra, peut entraîner un biais dans la représentativité des données statistiques de ces groupes.

Pour finir, on note aussi un léger manque dans la construction de l'ingénierie : l'absence de systèmes instables qui ne se déplacent pas. Les deux seuls systèmes instables (les pendules) sont en effet aussi les seuls qui se meuvent. Certes le premier cas peut fort bien se considérer comme un cas immobile (le chariot) mais c'est une précision supplémentaire à apporter dans cette partie.

7.5.8 Stabilité, troisième phase, second questionnaire individuel

Dans cette phase, on présente un livre sur une table et on passe d'une position A à une position B de ce livre sur la table en le déplaçant avec la main (c'est la seule expérience réelle²⁴ proposée aux étudiants). Dans le questionnaire individuel proposé, on demandait si le système était en équilibre dans les deux positions, ce qui n'a bien entendu pas posé de problème, mais permettait de bien rappeler qu'on était en présence d'un équilibre.

L'enseignant énonce qu'il va *perturber* le système, ce qui permet de relier ce déplacement avec la définition des perturbations précédemment utilisées (il ne s'agit pas d'une commande, ici, même si cela aurait pu être le cas). Pour chaque question, on obtient un taux de réponse (oui ou non) proche de 50%.

Sans regarder les détails de ces répartitions (qui importent peu), nous pouvons déjà considérer que la vérification de la définition trouvée précédemment, ne mène pas à des réponses claires concernant la stabilité ou l'instabilité de ces deux nouvelles situations d'équilibre.

24. Par opposition à « expérience de pensée ».

Ceci permet de valider la vérification locale proposée, VF2, et permettra dans la dernière phase, de lancer les débats de groupe sur ces différences, comme cela a été fait dans la partie précédente.

7.5.9 Stabilité, quatrième phase, seconde activité de groupe

Déroulement

La dernière phase, débute encore par une confrontation des points de vue des étudiants basée sur les différences observées aux réponses des questions de l'activité individuelle. L'idée qu'il faut essayer d'appliquer la définition précédente pour voir si elle permet d'expliquer ces nouveaux cas, n'est pas du tout évidente pour les élèves. Les définitions obtenues à la fin, semblent être plus le fait d'effets de *contrat didactique* (Brousseau, 1998) que d'une réelle avancée dans les réflexions engagées. En fait, aucune des discussions de groupe ne permet de faire émerger la problématique : le livre est en équilibre dans les deux cas (il y a un accord sur ce fait) mais la définition précédente permet de comprendre la position A ou B comme étant à la fois stable et instable, ce qui en montre les limites.

Plusieurs élèves font part de leur confusion dans leurs échanges et ce n'est qu'au prix de plusieurs interventions de l'enseignant que les étudiants paraissent s'apercevoir que la définition précédente ne permet pas de trancher dans les deux cas. Ce passage, qui vient après l'explication donnée sur l'existence d'une troisième catégorie d'équilibre, illustre bien cet état de confusion :

- En fait, alors, il y a deux choses : retourner à la position initiale et retourner...à l'équilibre...mais si la position initiale n'est pas un équilibre...alors quoi ? C'est un système indifférent ?
- Je crois, oui (GM3, 49 :37)

Ce doute sera levé plus tard, lors d'une demande de précision concernant ce retour du système vers une position d'équilibre ou à la position initiale.

Analyse

Finalement, les débats enregistrés, ne permettent pas de dire que les étudiants ont avancés, seuls, dans leurs réflexions sur la stabilité grâce à l'étude de ce dernier système.

Bien qu'ils aient tous convergé vers une définition « attendue » de la stabilité (et de l'instabilité), cela n'a été possible qu'avec de nombreuses clarifications venant de l'enseignant, qui, si elles ne sont pas « indésirables », sont néanmoins sources de dérives (par une moindre dévolution du problème) et affaiblissent donc l'effet escompté sur la construction individuelle des concepts en jeu. L'indicateur permettant de valider la seconde hypothèse de cette partie, I2, est donc seulement partiellement validé.

7.5.10 Conclusion

On peut considérer que globalement, l'ingénierie proposée permet d'amener les étudiants, à partir du *schème* initial identifié (cloisonné), vers un *schème*, sans doute plus homogène. Pendant cette ingénierie, les étudiants ont été confrontés à un ensemble de systèmes, certains nouveaux (le pendule sur un chariot), d'autres classiques (la balance) ou encore inhabituels dans ce registre (le corps humain, le livre) mais avec un dénominateur commun, l'équilibre, ce qui leur a permis de réfléchir à ce concept d'une manière nouvelle. Le fait de devoir redéfinir quelque chose que l'on pense déjà bien connaître, leur a paru compliqué (beaucoup en ont fait état), sans doute à cause de leur inexpérience de ce type d'activité qui alterne réflexions individuelles et réflexions de groupe.

Tous ont « globalement » remplis le contrat consistant à remettre à plat leur(s) conception(s), leur(s) définition(s), de l'équilibre et de la stabilité en tenant compte des avis contradictoires de leurs pairs, des questions proposées par l'enseignant et des éléments factuels concernant l'évolution des systèmes examinés (en somme, les rétroactions du milieu). Les situations proposées, ont joué leur rôle, en guidant les étudiants dans leurs réflexions, passant donc par les étapes qui nous paraissaient essentielles : la différenciation équilibre/stabilité/instabilité, l'influence de la définition de variables d'intérêt dans un système, la prise en compte du milieu extérieur par le biais des perturbations, et l'intervention de l'aspect temporel constitutif de ces concepts. Cependant, il n'est pas possible, bien entendu, de vérifier individuellement si cela a apporté l'effet escompté sur leurs *schèmes*, que ce soit un début de modification globale ou une modification d'une partie seulement. En effet, un certain nombre d'éléments peuvent nous indiquer que ce processus a, certes, pu démarrer mais qu'il faut le considérer comme très résistant au changement. De plus, l'organisation des séances souffre d'un problème certain qui pourraient mettre à mal tout les efforts entrepris : les discussions parfois longues et nombreuses des étudiants sur des sujets sans aucune importance avec les réflexions engagées

dans la tâche. Ceci, peut bien sûr être contrôlé en jouant sur le nombre d'étudiants par groupe et sur le nombre total de groupe.

7.6 Seconde expérimentation

La seconde expérimentation de cette ingénierie, a été basée sur exactement le même scénario, avec seulement quelques modifications mineures. L'une d'elles, concernait l'utilisation d'une planche de photos supplémentaire (en annexe), montrant les systèmes « balance » et « corps humain » à un instant ultérieur. Cette planche a été distribuée juste après le rendu des premiers questionnaires individuels pour nourrir la réflexion au sujet du facteur temporel dans la deuxième phase.

De même, il a été procédé à une clarification du concept d'équilibre, avant d'entamer la séance sur la stabilité. Un questionnaire supplémentaire a été distribué au début de la deuxième partie (sur le schéma du premier questionnaire individuel de l'équilibre) et un point a été proposé, « au groupe classe », pour ré-institutionnaliser les avancées de la séance précédente sur l'équilibre.

Enfin, il a été procédé à un découpage en trois de la section, afin de disposer de groupes de taille acceptable pour éviter les inconvénients de la deuxième partie de la première ingénierie, soit trois groupes d'une vingtaine d'étudiants répartis en 5 groupes de 4 à 5 individus.

7.7 Évaluation externe et entretiens d'explicitation

7.7.1 À propos des schémas expérimentaux

Dans cette étude nous avons utilisé deux schémas expérimentaux différents pour la première et la deuxième évaluation externe de cette ingénierie didactique. Le premier schéma est un schéma du type « un seul groupe avec pre-test/pos-test » et le second, un schéma du type « pré-test/post-test avec deux groupes de contrôle ».

Tous les tests ont été menés avec le questionnaire spécifique présenté en annexe B.2, à partir de la page 229.

Dans la conception d'expériences de recherche en éducation (Cohen, Manion, & Morrison, 2007 ; Best & Kahn, 1998), il est usuel de distinguer les facteurs influant sur la *validité interne* du test de ceux influant sur la *validité externe* ou *représentativité* :

- La validité interne fait référence aux problèmes qui peuvent influencer (dans le sens négatif) sur la capacité à tirer des conclusions ou des inférences causes-effets valides à partir de l'expérience conduite et qui sont liés à la procédure elle-même ou aux participants.
- La validité externe fait référence aux problèmes pouvant compromettre les possibilités d'extension des conclusions de l'expérience à une population plus large²⁵ du faits d'effets particuliers entre le traitement et les sujets.

Campbell et Stanley (1963) décrivent 12 facteurs qui peuvent compromettre la validité des test expérimentaux dans le champs de la recherche en éducation suivant le schéma utilisé :

1. Facteurs internes

- (a) L'histoire
- (b) La maturation
- (c) L'administration du test
- (d) L'instrumentation
- (e) La régression statistique
- (f) La sélection des sujets
- (g) La mortalité expérimentale
- (h) L'interaction sélection-maturation

2. Facteurs externes

- (a) Les effets d'interaction dans l'administration du test
- (b) Les effets d'interaction de sélection et les variables expérimentales
- (c) Les effets de réaction de l'arrangement de l'expérience
- (d) Les interférences de traitement multiples

Nous n'allons pas examiner tous ces facteurs dans le détail, mais seulement ceux qui ont eu la plus grande influence ici. Pour ceux-ci, nous discuterons les choix opérés pour chaque schéma d'expérience.

25. Ou seulement à un autre groupe de sujets

L'histoire Ce sont les événements particuliers qui se produisent entre la première et la deuxième mesure et qui s'additionnent à la variable expérimentale. On espère en général que seul le traitement (*i.e.* l'intervention didactique) va influencer sur le résultat du test, cependant, les activités des étudiants entre les deux tests peuvent apporter des éléments qui vont leur permettre d'atteindre une meilleure performance au post-test. Ici, pour la première session, nous n'avons pas de groupe témoin, ce qui nous interdit donc de prendre en compte cet effet. Or, celui-ci peut se révéler important, l'enseignement reçu pendant le semestre s'additionnant à l'intervention didactique, certains objectifs étant finalement communs (même si l'on peut considérer que les approches sont différentes, une compréhension adéquate de l'équilibre et de la stabilité est attendue dans les deux cas). C'est pour cela que les résultats de la première session ne seront pas discutés dans le détail.

Pour la deuxième session, le pré-test ayant lieu au tout début du cours et le post-test, à la fin, on peut s'attendre à un effet additif des deux actions : cours et ingénierie didactique, cela pourra être mesuré par le schéma expérimental choisi.

L'administration du test C'est l'effet même du passage du test sur le score au second test. Il est question ici, au moins pour la première partie, pour laquelle on demande une prévision et on propose ensuite les solutions (ce qui arrive lorsque l'on lâche la barre). Clairement, même sans comprendre ce qu'il y a en jeu dans le test, la mémorisation de l'évolution de la barre dans les différentes positions, permet d'améliorer son score dans cette partie. Il a été constaté cet effet d'amélioration, de manière systématique : avec un codage simple, consistant à additionner le nombre de réponses correctes aux prévisions de mouvement, nous avons constaté une amélioration de la moyenne de l'ordre de 0,6 à 1,2 points sur 7 (augmentation statistiquement significative vérifiée avec un test des rangs signés de Wilcoxon pour échantillons appariés).

La première partie du test n'est donc pas exploitable pour des comparaisons pré-test/post-test²⁶.

L'instrumentation En quoi les changements de calibration dans l'instrument de mesure ou les changements de correcteurs (en temps qu'individu) vont produire des différences dans les scores aux différents tests. Ici, c'est le même instrument qui est utilisé, avec l'hypothèse d'une absence d'effet d'apprentissage pour la deuxième partie (par

26. En fait, cette première partie sert à jauger les étudiants, et a donc une utilisation « mono-coup ».

construction de l'outil, voir en annexe, page 229).

La sélection des sujets C'est l'influence de la sélection des individus sur le résultat du test. Par exemple si l'on demande des volontaires de participer à un test ou que l'on sélectionne des individus sur des critères que toute la population ne partage pas, on introduit un biais de sélection puisque le résultat ne sera pas représentatif de toute la population considérée. Pour minimiser ce biais, on sélectionne en général les candidats de manière aléatoire dans la population considérée si l'on ne peut pas tester l'ensemble de celle-ci. Dans notre cas, nous avons sélectionné tous les élèves d'une section. L'inscription des élèves dans cette section n'étant pas le fruit du hasard, on ne peut garantir le fait que cette population soit représentative de toute la population estudiantine du cours de contrôle de la faculté : ceci est confirmé par la répartition par carrière de chaque section du cours (c'est-à-dire que chaque section ne comporte pas une répartition identique des étudiants en fonction de leur carrière). Cependant, les résultats aux évaluations finales communes pour les autres sections sont sensiblement identiques (pas de différence statistiquement significatives) à ceux de notre la nôtre ce qui laisse à penser que du point de vue du niveau académique ils ne sont pas différents.

7.7.2 Construction d'un indicateur

Afin d'obtenir une valeur, un indicateur, permettant d'apprécier l'évolution des réponses au questionnaire en ligne par des traitements statistiques, nous avons utilisé les éléments suivants du questionnaire informatisé :

- Le nombre de réponses correctes dans la partie équilibre « évolutionniste »
- Le nombre de réponses correctes dans la partie stabilité « évolutionniste »
- Le type de système proposé (droit ou coudé, voir la description du test page 229)

Un poids plus important a été affecté aux réponses concernant l'équilibre dans les positions inclinées²⁷ de chaque système, qu'à celles concernant les positions horizontales, étant donné que ces dernières posent moins de « difficultés » (c'est-à-dire qu'elles ne requièrent pas un niveau de compréhension aussi élevé ou qu'elles sont représentatives

27. Et encore plus pour le système indifférent pour lequel on souhaite évaluer l'influence de la conception « équilibre = position naturelle ».

de conceptions erronées identifiées). Un facteur d'affaiblissement a été appliqué aux réponses concernant le système coudé. Ce type de système amène, en effet, une information supplémentaire (la « forme » du système) qui pourrait biaiser l'effet que l'on cherche à évaluer (les statistiques montrent un écart significatif entre les réponses pour les deux systèmes dans la première partie du test, ce que les entretiens individuels confirment). Il a été donné un poids comparable aux réponses concernant l'identification de la stabilité de la position horizontale du système « S2 » qu'à l'identification de l'instabilité de la position horizontale du système « S3 ». Le système indifférent n'a pas été pris en compte, s'agissant d'un cas particulier s'appliquant aux systèmes libres, cet aspect peut être jugé comme secondaire (par rapport à la discrimination (stable/instable). Ceci nous donne un indicateur numérique qui varie entre 0 et 14, dont on peut ensuite analyser la progressions entre les pré- et post- tests de tous nos groupes.

Une campagne de test sur 90 élèves inscrits dans des cours d'automatique dans deux universités colombiennes (Université de Los Andes et Université Technologique de Bolívar) au premier semestre 2013 nous ont donné un score moyen global typique (SMGT) de cette population de 8,3/14 pour notre échelle de mesure (en somme, un score de référence pour ce type de population).

7.7.3 Première session, deuxième semestre 2013

Le schéma utilisé est du type « à un groupe avec pré-test/post-test ». Dans ce schéma, il n'y a qu'un groupe d'étudiant qui passe un test avant l'intervention didactique (le pré-test O_1) et après l'intervention (le post-test O_2). Comme le mentionne Best et Kahn (1998), ce schéma, qualifié de dessin pseudo-expérimental souffre de multiples inconvénients malgré son utilisation courante en enseignement, ce qui a justifié un autre schéma pour le second semestre.

Le test choisi, présenté en annexe, page 229, ne fait pas appel aux objets ou situations exactes de la séquence d'ingénierie didactique (même si l'exemple de la balance en est proche), ce qui doit permettre de vérifier que les concepts vus précédemment ont pu être transférés à une situation nouvelle, étant entendu que l'on attend l'application d'une procédure, d'une connaissance procédurale (Solaz-Portolés & López, 2003) pour répondre correctement aux questions posées.

Mise en œuvre

Le pré-test a été proposé fin juillet 2013 (30, 31 juillet et 1 le 2 août) et présenté comme une épreuve diagnostique. L'ingénierie didactique s'est déroulée le 9 et le 14 août pour les 12 élèves du groupe « carrière » et le 21 et 23 août pour les 28 étudiants du groupe « mixte ». Le post-test a été proposé le 4 septembre à 37 d'entre eux et parmi ceux-ci, 35 ont effectivement passé le pré- et le post-test, dont 10 du groupe « carrière ».

Résultats

Afin d'obtenir un premier résultat, nous avons sommé les réponses correctes aux questions sur l'équilibre de la partie « évolutionniste », en leur affectant un poids égal (indicateur simple, différent de celui évoqué plus haut).

Nous avons menés des analyses statistiques basés sur le test de rang signé de Wilcoxon pour données appariées (en effet, les données ne peuvent pas être considérées comme des données paramétriques pour utiliser un test de Fisher ou de Student, par exemple). Ce test est statistiquement significatif ($p = 0.0326 < 5\%$) ce qui indique que la différence de moyenne observée entre les deux passages du test (supposé sans effet d'apprentissage) n'a que 3% de chance d'être due au hasard.

Comme cela a été indiqué plus haut, cette significativité est à modérer, eu égard aux biais inhérents au schéma expérimental choisi. On remarque, en effet, que les résultats des étudiants sont légèrement différents entre le groupe « carrière » et le groupe « mixte ». On pourrait attribuer cela au manque d'implication des étudiants du groupe mixte (réparti en 6 groupes mixtes) puisque la différence va dans le sens d'un résultat inférieur pour ces élèves, dont on a constaté, par ailleurs, le manque d'implication dans l'activité. On peut donc, à ce stade, avancer que la séquence d'ingénierie didactique proposée a pu participer à l'amélioration des réponses des étudiants au test « évolutionniste » qui vise à évaluer la compréhension de la nature de l'équilibre comme un état stationnaire (non disciplinaire) sans que l'on soit pour autant en mesure de séparer cet effet de celui du cours complet de contrôle (un autre « traitement ») ou de l'implication de l'enseignant (effet « enseignant »).

On peut ajouter que l'examen final commun – essentiellement basé sur des connaissances déclaratives et procédurales – du cours de contrôle n'a montré aucune différence significative entre les quatre sections ($p = 0,24^{28}$).

28. Avec un test d'analyse de la variance de type ANOVA, les données étant normalement distribuées.

7.7.4 Entretiens d'explicitations

Quelques étudiants (une dizaine) n'ont cependant pas amélioré leur score entre le pré-test et le post-test et d'autres ont même obtenu un score moins élevé. Afin de comprendre ce qui avait pu conduire à cette « régression », nous avons choisi neuf de ces étudiants pour un entretien d'explicitation basé sur le même questionnaire et organisé sous la forme d'un « think-aloud »²⁹ guidé et enregistré, autour du même test. Ces tests, ont principalement servi à valider certains aspects de l'outil de test présenté en annexe. Le lecteur trouvera donc ces éléments en annexe, à partir de la page 234.

7.7.5 Deuxième session, premier semestre 2014

Pour la deuxième mise en œuvre de l'ingénierie didactique nous avons utilisé un schéma pré-test/post-test avec groupe de contrôle (dénommé « C1 ») qui est un schéma expérimental très utilisé. Nous avons aussi utilisé un autre groupe témoin ou de contrôle (dénommé « C2 »), uniquement en post-test, ce qui nous donne un schéma expérimental plus riche qu'un schéma classique « pré-test/post-test avec groupe témoin » et proche du schéma expérimental appelé « Solomon » (Solomon, 1949 ; Braver, Braver, & Meta-analysis, 1988). Celui-ci nous permet de mesurer l'effet du passage du même test deux fois de suite (en comparant les deux groupes témoins entre eux) en plus de mesurer l'effet de l'intervention didactique en comparant les résultats des pré-tests/post-tests sur le groupe témoin et le groupe qui a suivi l'ingénierie.

Mise en œuvre

Le pré-test a été proposé le 20 janvier 2014 et présenté comme une épreuve diagnostique à toute la section, soit 54 étudiants. L'ingénierie didactique s'est déroulée au tout début du semestre pour toute la section, répartie en trois groupes de 20, 19 et 19 étudiants, les 27, 29 et 31 janvier 2014 pour la partie sur l'équilibre et les 3, 5 et 7 février pour la partie sur la stabilité. Le post-test a été proposé le 20 mai 2014 à toute la section (53 étudiants présents), 50 étudiants ont effectivement passé le pré- et le post-test (groupe « traitement », appelé MC, appairés).

41 étudiants du groupe de contrôle (appelé AG) ont passé le pré-test, un mois après le

29. Aussi appelé « talk-aloud » (Ericsson & Simon, 1980), cette démarche consiste à mettre chacun des sondés devant une tâche, à charge pour lui de l'effectuer en réfléchissant à voix haute, en présence d'un enseignant.

début du semestre, et 51 le post-test, à la fin du semestre. 38 ont effectivement passé le pré et le post-test (groupe contrôle appairés). Dans le second groupe de contrôle, 22 élèves ont passé le post-test.

Résultats

Nous avons utilisé le codage spécifique décrit plus haut, plus fin que celui de la première session, un critère portant à la fois sur les réponses concernant l'équilibre et la stabilité avec une modulation selon le type de système et la position concernée.

De même, nous avons comparé les groupes de départ entre eux pour vérifier qu'il n'y avait pas de différence relativement à notre indicateur. On remarque que les résultats des trois groupes à un premier passage du test (pré-test pour les groupes MG et AG, post-test pour le groupe NQ) sont du même ordre que le SMGT (voir section 7.7.2) ce qui indique une certaine cohérence de notre outil. Les résultats graphiques de la comparaison des groupes MC (traitement) et AG (contrôle) est visible sur le graphique 7.9.

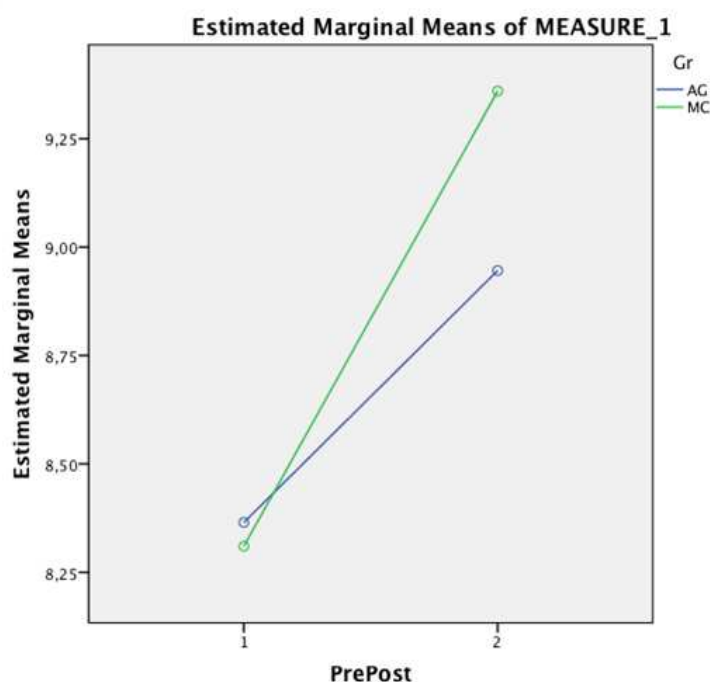


FIGURE 7.9 – Comparaison des moyennes des groupes MC et contrôle (AG), au pré- et post-test.

Les distributions entre le pré- et le post-test sont statistiquement différentes ($p =$

TABLE 7.2 – Moyenne des différents groupes selon le schéma adopté

Groupe	Pré-test	Ingé. Didac.	Post-test
MC	8,3	✓	9,4
AG	8,4	×	8,9
NQ	×	×	8,2

0,039³⁰) si l'on considère l'ensemble des individus des deux groupes, et la différence entre le pré- et le post-test pour le groupe « traitement » est faiblement significative (c'est en fait une tendance, avec un $p = 0,06$ ³¹.), ce qui n'est pas le cas pour le groupe de contrôle ($p = 0,21$). En ce qui concerne le deuxième groupe de contrôle, il n'apparaît pas de différence significative de distribution³² entre les pré-tests des groupes MC (« traitement »), AG (contrôle 1) et le post-test du groupe NQ (contrôle 2). Le tableau 7.2 récapitule les moyennes observées : dans ce cas de figure, les différences observées entre le groupe MC (traitement) et le groupe AG (contrôle 1) pourraient s'expliquer par l'action de l'ingénierie didactique associée à un faible effet d'apprentissage du test. Cet effet dû au test est tout à fait envisageable car s'agissant du même test utilisé comme pré-test et comme post-test, même sans connaître les réponses correctes (attendues), on ne peut exclure que la présentation de ce test ait poussé les étudiants à réfléchir à ces problèmes et à en chercher les réponses entre les deux passations.

On peut ajouter que l'examen final commun du cours de contrôle n'a montré, là encore, aucune différence significative entre les trois sections ($p = 0,78$ ³³).

7.8 Conclusion

L'analyse préliminaire effectuée (conjointement avec la première partie), nous a montré que le passé académique et les expériences quotidiennes des étudiants favorisaient le développement de conceptions multiples, très dépendantes du contexte, et que ce développement se faisait en parallèle de l'acquisition des connaissances du domaine, sans intégrations mutuelles. Les étudiants arrivent donc dans l'enseignement supérieur avec des connaissances souvent non opérationnelles et utilisant, selon les situations, un

30. Pour un test d'analyse de variance signé de Friedman apparié.

31. Pour un test de rang signé de Wilcoxon apparié

32. Avec une ANOVA, $p = 0.987$

33. Avec un test d'analyse de la variance de type ANOVA, les données étant normalement distribuées.

raisonnement, induisant trois grandes conceptions liées au caractère immobile, stable ou instable des équilibres identifiés. Nous avons conçu une ingénierie didactique visant spécifiquement un début de changement conceptuel chez les étudiants, ayant pour objectif une compréhension globale de ces concepts, et ce, en les amenant à les redéfinir autour d'un ensemble de situations mettant en jeu des systèmes libres ou commandés, bien choisis. Lors de cette ingénierie, nous avons pu constater les changements intervenus dans leur compréhension de ces phénomènes. En particulier, le passage par une conception intermédiaire lié à l'immobilité, permet, d'une part, de prendre en compte l'aspect temporel inhérent à ces concepts, et d'autre part, de questionner les aspects liés aux référentiels ou aux variables d'intérêt lors de l'examen de systèmes dynamiques. La mise au point sur l'équilibre avant celle de la stabilité et l'inclusion de systèmes libres et commandés permet de questionner l'effet du milieu extérieur sur le système (la définition et l'influence des perturbations). Enfin, l'examen des mêmes systèmes pour définir l'équilibre et la stabilité en deux temps différents, permet de lier les deux concepts sans les mélanger.

Une évaluation externe de l'impact de cette ingénierie a été mis en œuvre et a montré une tendance à l'amélioration de la réussite à un test spécifique dans le groupe qui a suivi l'ingénierie, plus importante que dans le groupe de contrôle. Les schémas expérimentaux (et pseudo-expérimentaux) choisis pour cette évaluation étant entachés de biais, inhérents à leur architecture ou à leur mise en œuvre, on ne peut en tirer aucune conclusion formelle. On peut cependant inférer que les 2h40 qu'ont duré cette activité n'ont pu que démarrer un changement conceptuel qui demanderait donc à se prolonger par d'autres activités. On peut aussi penser que l'utilisation de schémas expérimentaux plus robustes face aux biais statistiques, comme un « vrai » schéma Solomon à 4 groupes et une « randomisation »³⁴ des étudiants amènerait, au minimum, des résultats plus fiables. Cependant, on peut noter que l'évaluation des étudiants lors de l'examen final du cours, n'a montré aucune différence entre les différentes sections (celles qui ont suivi l'ingénierie et les autres), ce qui suggère que le temps passé sur cette activité n'a pas été préjudiciable à l'acquisition des connaissances déclaratives et procédurales évaluées par ce test.

34. C'est-à-dire, choisir aléatoirement les élèves qui vont participer à l'ingénierie.

Conclusion

Nous avons vu qu'une ingénierie didactique focalisée sur l'aspect temporel des définitions de l'équilibre et de la stabilité, nommé « évolutionniste », ainsi que sur une prise en compte des actions extérieures (passant par une définition minimum des contours du système considéré) pouvait permettre aux étudiants de construire une définition opérationnelle de ces concepts, ne s'appuyant pas sur les critères disciplinaires classiques. La méthodologie de l'ingénierie didactique, nous permet de proposer une séquence « répliquable » de manière contrôlée, en insistant au besoin, sur des éléments particuliers qui dépendent du public concerné (selon le niveau de formulation désiré, par exemple).

De plus, cette méthode permet d'améliorer l'identification des cas d'équilibre pour des systèmes mécaniques de type balance, lesquels sont représentatifs de conceptions erronées. Le but visé par cette ingénierie, était l'amorçage d'un changement conceptuel chez les étudiants relativement à l'équilibre et à la stabilité. Même si on a pu constater quelques indices allant dans ce sens, il paraît hasardeux à ce stade d'affirmer la mise en évidence de ce changement ou son démarrage par l'utilisation d'un seul test. Ceci n'est néanmoins pas inattendu. Dans leur article, Treagust et Duit (2008) listent les nombreux aspects à prendre en compte pour modéliser les changements conceptuels et relèvent trois défis pour la recherche sur ce domaine parmi lesquels figure l'identification des preuves du changement conceptuel.

CONCLUSION

TROISIÈME PARTIE

Conclusions et perspectives



Conclusions

Nous avons constaté des difficultés chez les étudiants, dans la résolution de problèmes mettant en jeu les concepts d'*équilibre* et de *stabilité* en automatique, la partie technologique de la « science de la commande des systèmes complexes », enseignée dans les cursus ingénieurs en France et à l'étranger. Or, les étudiants arrivent dans ces cursus, en ayant déjà été confrontés à ces concepts dans plusieurs disciplines scolaires comme la mécanique, mais aussi dans leur vie quotidienne. Nous nous sommes donc demandé quel était le lien entre la construction de ces deux concepts chez les étudiants et les difficultés de compréhension que l'on peut encore observer à la fin des cours d'automatique.

Dans la première partie, nous avons tout d'abord cherché à déceler et caractériser ces difficultés. Nous avons constaté que la recherche en didactique s'était peu intéressée à ces concepts, et exclusivement dans un cadre statique. Ceci nous a conduit à envisager l'utilisation de situations originales mettant en jeu un système en apparence bien connu des étudiants, comme le pendule, dans une situation dynamique (sur un chariot mobile). Cette première étude, nous a permis de découvrir que les étudiants n'envisageaient pas les causes de l'équilibre comme étant identiques en cas d'équilibre stable et instable, ceci suggérant qu'il n'y avait pas, dans leur esprit, un lien adéquat entre équilibre, stable et instable. Nous avons pu montrer en particulier, que l'équilibre instable n'était pas considéré comme un « vrai » équilibre par les étudiants, tout au moins, d'une qualité inférieure à l'équilibre stable, en quelque sorte, moins robuste, disparaissant en cas de mouvement, par exemple (ce qui n'est pas, en soit, erroné, mais dépend du type de mouvement). Nous avons contribué à la nomenclature des *facettes* de Minstrell, en ajoutant des cas particuliers de situations dans lesquelles l'équilibre (déjà présent dans plusieurs de ses *clusters*) peut être relié au mouvement.

Afin de vérifier les connaissances académiques des étudiants sur ces concepts, et leurs implications dans les réponses données aux questions les mettant en jeu dans des situations statiques et dynamiques, nous avons conduit une étude basée sur une démarche d'évaluation en situation de résolution de problèmes. Les connaissances déclaratives,

procédurales et schématiques des étudiants ont été testées à l'aide d'un questionnaire incluant : un système mécanique complexe dont il fallait prévoir l'évolution, un système mécanique classique (un cube sur un plan incliné) pour lequel il fallait juger l'équilibre (par l'application d'un bilan de force) et finalement une question directe sur la définition de l'équilibre. Nous avons constaté que les connaissances déclaratives des étudiants étaient plutôt approximatives, et qu'ils ne possédaient pas les connaissances schématiques adéquates leur permettant de prévoir l'évolution d'un système « non classique »¹, ceci nous conduisant à considérer que leurs conceptions de l'équilibre et de la stabilité étaient peu opérationnelles sur des systèmes différents des standards académiques (pendule pesant simple, objets sur un plan incliné, etc.).

Ceci explique-t-il à lui seul les conceptions relevées dans la première étude ? Non. Nous avons constaté que, qu'elle soient approximatives ou non, les connaissances académiques des étudiants ne sont pas les seules mobilisées dans les résolutions de problèmes examinés. Les étudiants font preuve de raisonnements qui, souvent, ne découlent pas de connaissances académiques ou paraissent en incohérence avec l'application de celles-ci. Nous avons donc cherché à connaître les causes du développement de ces raisonnements ou conceptions alternatives chez les étudiants, en examinant l'effet combiné de leurs expériences académiques et quotidiennes passées. Il s'est avéré que les enseignements reçus par les élèves ne favorisent pas une compréhension homogène de ces concepts, soit parce qu'ils sont focalisés sur des cas particuliers très peu représentatifs de la majorité des équilibres (comme la balance), soit qu'ils renforcent des raisonnements du sens commun (comme en EPS²). D'autre part, on trouve dans l'expérience quotidienne (y compris langagière), les traces des amalgames dont font état les étudiants entre équilibre et stabilité. Ceci nous a conduit à identifier trois grandes classes de conceptions relatives à l'équilibre dans lesquelles la stabilité apparaît intriquée : l'équilibre-immobile, l'équilibre-stable et l'équilibre-instable. Chacune étant mise à contribution dans des situations différentes, ce qui en renforce l'aspect morcelé mais toutes, pouvant être comprises comme la manifestation du même « schème » (pour reprendre un terme de la théorie des champs conceptuels de Vergnaud).

Afin de tenter d'agir sur ces conceptions au niveau de l'enseignement supérieur, nous avons conçu une ingénierie didactique basée sur la promotion d'un changement conceptuel, à partir de l'étude de situations représentatives des trois classes de conceptions

1. Du point de vue académique.

2. Éducation Physique et Sportive.

identifiées, étudiées sous un aspect non disciplinaire faisant appel au caractère stationnaire de l'équilibre. L'idée étant de faire travailler les élèves à partir d'une approche que l'on a qualifiée « d'évolutionniste », centrée sur les changements intervenant dans les systèmes au cours du temps, favorisant l'apparition d'un conflit cognitif qui est ensuite mis à profit pour amener les étudiants à (re)définir par eux-mêmes les concepts cibles en s'aidant des situations proposées. Cette ingénierie, testée dans une université au niveau d'un cours d'automatique, s'est avérée d'une efficacité relative. D'une part, les contraintes d'organisation la rendent délicate à mener de manière satisfaisante, d'autre part, les conceptions des étudiants s'avèrent plutôt très résistantes au changement (ce qui avait été néanmoins anticipé). Cependant, nous pouvons considérer que les évolutions positives constatées par le biais de questionnaires d'évaluation spécifiques, sont sans doute le signe d'un début de changement conceptuel, qui demanderait, néanmoins, à être renforcé par un travail à plus long terme pour atteindre l'objectif fixé : un changement durable des conceptions estudiantines.

Nous avons donc vu que les conceptions des étudiants à propos de l'équilibre et de stabilité font obstacle à une compréhension générale, homogène, transdisciplinaire de ces concepts, comme celle qui est attendue en automatique, dans de nombreuses situations. Ceci a bien entendu des implications dans la résolution de certains problèmes académiques en automatique (dans lesquelles les savoirs déclaratifs, procéduraux et schématiques liés aux critères de stabilité et d'équilibre, sont en jeu) mais on a constaté un effet plus général sur la compréhension de la nature même de l'équilibre et de la stabilité. Ce manque de compréhension des étudiants relativement à ces concepts, pose le problème de « l'efficacité » de l'enseignement reçu sur ces sujets, de l'école primaire jusqu'au lycée. En effet, il s'avère que finalement, les conceptions des étudiants sont façonnées dans des proportions très importantes par le monde extra-scolaire et que l'impact des enseignements reçus, compte plus sur le champ des connaissances déclaratives et procédurales (voir première partie) que sur celui des compétences³. Ceci peut paraître pour le moins insatisfaisant.

Avant de proposer quelques pistes envisageables pour tenter d'améliorer cette situation, examinons une des implications possibles de ce manque de compréhension.

3. Dans le sens défini par Roegiers (2001).

En quoi le manque de compréhension des concepts d'équilibre et de stabilité est-il problématique chez les élèves ingénieurs ?

9.1 Introduction

Intéressons-nous un instant au problème que peut susciter ce manque de compréhension au niveau de notre public cible, les étudiants des cours d'automatique dans les cursus d'ingénierie.

En particulier, le manque de compréhension relevé chez les étudiants de notre panel, pourrait-il, par exemple, avoir une conséquence directe sur les compétences en conception de systèmes de contrôle de ces futurs ingénieurs, dans la mesure où les systèmes rencontrés dans le monde professionnel, sont majoritairement plus complexes que ceux rencontrés dans les cours d'automatique ?

Dans les entretiens d'explicitation, les questionnaires inclus dans des devoirs surveillés (examens) d'automatique et les interactions en classe lors de l'ingénierie didactique, il apparaît que les étudiants de France et de Colombie appréhendent difficilement le caractère intrinsèque de la stabilité et considèrent, pour beaucoup, que l'entrée du système étudié intervient directement dans sa définition¹. En effet, comme on l'a dit précédemment, le fait qu'un système possède, ou non, des états d'équilibre et que ces états soient stables, ou non, ne dépend ni de la nature de l'entrée du système, ni de sa valeur (dans le sens d'*amplitude*). Ceci n'est évidemment pas « intuitif » et va à l'encontre de nombre d'expériences de la vie quotidienne (on est ici directement confronté au problème de

1. Alors qu'elle intervient dans sa vérification.

la différence modèle/réel). Plusieurs étudiants considèrent en effet que l'amplitude de l'entrée ou d'une perturbation du système va entraîner un comportement instable, par exemple, ce qui dans le cas d'étude du corps humain de l'ingénierie didactique, est directement issu de l'expérience quotidienne, formulée directement par les étudiants sous la forme « si l'on pousse un peu sur la femme qui fait du yoga elle pourra conserver sa position alors que si on la pousse plus fort, elle va tomber » ce qui est traduit, en conséquence, sur son caractère « stable » par : si l'entrée est faible, le système est stable et si l'entrée est forte, le système est instable. (extrapolée ensuite probablement dans le sens : si l'entrée est constante, le système est stable et si l'entrée augmente², le système est instable). Cette conception implique une définition de la stabilité dépendante de l'entrée. Nous avons d'abord tenté de mesurer l'étendue de cette conception chez les étudiants de notre panel (en France et en Colombie), avec l'idée, d'en étudier plus tard, à la fois, l'impact dans la conception³ des systèmes de contrôle et aussi les liens entre cette conception erronée et les conceptions déjà mis à jour à propos de l'équilibre.

9.2 La question de « l'influence de l'entrée »

Comme on l'a dit précédemment, lors des séances d'ingénierie didactique plusieurs étudiants font état ouvertement (à l'oral et par écrit) d'une conception « stabilité entrée-dépendante ». Nous avons interrogé des élèves d'école d'ingénieur sur ce sujet précis et des étudiants de faculté d'ingénierie d'une université colombienne. Pour les premiers, il a été inclus, dans un devoir surveillé d'automatique, plusieurs questions non consécutives, relatives au lien entre l'entrée d'un système et sa stabilité. Pour les seconds, il s'agissait d'une seule question dans un examen final d'un cours de contrôle des systèmes.

9.2.1 En école d'ingénieur

Une promotion entière d'élèves de deuxième année d'école d'ingénieur a été interrogée lors du partiel de fin d'année du cours d'automatique de 2012, soit 169 élèves. Il y avait trois questions, non consécutives, relatives à la stabilité d'un système et aux liens possibles avec le type d'entrée⁴. Ces questions avaient un triple objectif : une évaluation

2. Comme pour un signal en rampe.

3. Ici dans le sens de *création*, de *design* anglo-saxon

4. Échelon, rampe, etc.

des connaissances des étudiants sur ce sujet (procédurales pour deux des questions), un test de compréhension (pour la première) et finalement un test de cohérence entre les réponses à ces trois questions.

La première question sur le sujet était :

Exercice 1.

Répondre par VRAI ou FAUX et justifier.

- a. Un système linéaire en boucle fermée peut être stable pour un signal de référence donné et instable pour un autre ?
- b. [...]

La question est précise quant au type de système considéré (linéaire en boucle fermée) mais ne précise pas la nature du signal d'entrée pour lequel le système serait stable ou instable.

Les résultats montrent un taux de réponses incorrectes de 67% (29% de réponses correctes et 4% de réponses blanches).

Comme cela a été dit, la question est assez ouverte puisque l'on ne spécifie pas la nature du signal d'entrée. On remarque cependant que 21% des étudiants qui ont répondu de manière incorrecte, invoquent le même argument qui oppose le comportement du système face à une entrée en échelon, à celui face à une rampe. Pour ceux qui justifient avec soin leur réponse, on peut en effet lire que « un système bouclé stable pour un échelon ne l'est pas forcément pour une rampe », « un système du second ordre peut être stable pour un échelon et instable pour une rampe » ou « échelon VS rampe dans le cas d'un régulateur P », etc.

Ce qui, clairement, va toujours dans le sens de la stabilité pour un système qui reçoit un échelon en entrée et de l'instabilité pour une entrée en rampe.

Les deuxième et troisième questions sur le sujet, portaient sur la stabilité d'un système donné à partir de la fonction de transfert du système. Il s'agissait ici de vérifier que les étudiants connaissaient un ou plusieurs critères algébriques de stabilité et voir à quoi ils les « raccrochaient ».

Exercice 2 :

Soit un système décrit par l'équation différentielle suivante [...]

- 1. En utilisant la transformée de Laplace, calculer la réponse indicielle $y(t)$ pour $t \neq 0$.
- 2. Ce système est-il stable en boucle ouverte ? Justifier votre réponse.

La deuxième question, fait référence à l'entrée du système mais aucun critère préférentiel n'était donné aux étudiants pour conclure (lieu des pôles par calcul direct, application du critère de Routh-Hurwitz, etc.). Le taux de réponses strictement correctes (c'est-à-dire correctes et correctement justifiées) est de 22%.

Exercice 7 : Fonction de transfert et tracé de Bode

$$G(p) = \frac{0,1(1+0,1p)}{p(1+p)(1+0,01p)}$$

1. Soit le système décrit par la fonction de transfert ci-dessus. Est-il stable ?
2. Quels sont les pôles de $G(p)$?

Cette dernière question propose de calculer les pôles d'un système à partir de sa fonction de transfert, et de dire si le système est stable (il s'agit donc d'une question guidée, demandant d'appliquer un savoir procédural, le calcul des racines d'un polynôme, puis un savoir déclaratif, la stabilité en fonction du signe de la partie réelle de ces racines). Dans les réponses correctes attendues, figuraient le calcul des pôles de cette fonction de transfert (de manière directe) et l'énonciation du critère qui permet de dire, selon le signe de leur partie réelle, si le système est stable ou non.

82% des étudiants trouvent tous les pôles du système et 62% concluent correctement à partir de cette information sur la stabilité du système.

9.2.2 En faculté d'ingénierie

Seule une section de la promotion d'étudiants du deuxième semestre 2013 a été interrogée, soit 38 étudiants et ce, au milieu du semestre, deux mois après les séances d'ingénierie didactique, lors d'un examen partiel (qui n'étaient pas focalisés sur ce point puisque les systèmes présentés n'avaient pas d'entrée identifiée). Pour cette question, on a choisi de proposer aux élèves de se prononcer sur une question plus précise que pour le test précédent en allant justement dans le sens de la conception erronée détectée. La question était formulée de la façon suivante :

Un ami m'a dit « un système linéaire peut être stable pour une entrée en échelon et instable pour une entrée en rampe » Êtes-vous d'accord avec lui ? Justifiez votre réponse.

Le résultat montre que 79% des 38 étudiants interrogés étaient d'accord avec l'affirmation – fausse – de la question.

Cette formulation fait directement appel aux conceptions erronées liées à la « forme du signal » d'entrée qui ont été relevées lors de l'enquête française.

Au premier semestre de l'année suivante, nous avons posé de nouveau la question dans sa formulation la moins précise (identique à celle posée en école d'ingénieur française) lors d'un examen final du cours de contrôle, dans la même université :

Un système linéaire en boucle fermée peut être stable pour un signal de référence donné et instable pour un autre : Oui/Non

Cette fois-ci, nous avons interrogé toutes les sections, soit 145 étudiants (52 + 39 + 54). On obtient des taux de réponses incorrectes très proches pour chacune de ces sections : 46%, 51% et 50%.

9.2.3 Discussion des résultats

Le questionnaire Français visait à discuter, entre autres, le lien entre le calcul des pôles de la fonction de transfert du système et la stabilité de celui-ci et l'influence de l'entrée du système sur sa stabilité. L'hypothèse que l'on pouvait faire, était que les étudiants qui savaient calculer les pôles de la fonction de transfert et en déduire la stabilité du système, devaient donc en conclure que l'entrée du système n'intervenant pas dans ce calcul et qu'elle ne pouvait donc pas avoir d'influence sur la stabilité. Or, 20% des élèves ont répondu de façon incohérente (implicitement) à la première et la troisième question. c'est-à-dire qu'il n'ont pas fait le rapprochement entre le calcul des pôles – qui est indépendant de l'entrée – et l'approche entrée-sortie (29% des étudiants ont répondu correctement aux deux questions mais cela ne dit rien sur l'existence du lien entre les deux questions, cela peut être une coïncidence).

Ce que l'on peut en conclure en première approximation, c'est que ce lien n'est pas établi par les élèves de manière spontanée. Une majorité des étudiants connaît au moins un critère algébrique de stabilité basé sur la fonction de transfert du système, critère dans lequel n'intervient pas l'entrée du système. Pour autant, une majorité pense que l'entrée du système influe sur la stabilité de celui-ci. Ceci paraît pour le moins contradictoire. Cependant, cette contradiction n'est présente que si l'on conçoit la fonction de trans-

fert⁵ d'un système comme une représentation de celui-ci indépendante de l'entrée. Or ceci n'est pas immédiat. En effet, lors des deux sessions d'ingénierie didactique il a été remarqué que la séparation modèle/système-physique-réel n'était pas toujours effective. Certains attributs ou comportements du système physique étant transférés directement au modèle, comme la sensibilité à l'*intensité* de la perturbation par exemple. On touche là à un problème qui dépasse le cadre de notre recherche, et qui fait écho à la conception même du *modèle* et à ses limites.

Cependant, on ne peut exclure que les étudiants qui ont une conception claire de l'équilibre et de la stabilité –et notamment sur le fait que ce sont des caractéristiques intrinsèques du système– aient une conception plus claire aussi des limites d'un modèle, de ce qu'elles impliquent, et plus globalement, une meilleure compréhension de l'automatique. En effet, les questions posées en examen, en école d'ingénieur, bien que ne représentant que 10% de la note globale, en expliquent 50% de sa variation⁶ (aucun des élèves qui a répondu incorrectement à ces 3 questions n'a eu de note au dessus de la moyenne à cet examen).

9.3 Conclusion

On ne peut exclure qu'il y ait un lien entre les difficultés de compréhension de l'équilibre et de la stabilité chez les étudiants, les raisonnements que nous a révélés la première partie de cette étude et la conception « entrée-dépendante » de la stabilité montrée ci-dessus, qui est aussi apparue lors de l'ingénierie didactique. Cependant, le lien exact entre ces différentes conceptions demande à être précisé, notamment parce qu'ici, apparaît un lien avec le concept de *modèle*, qui dépasse le cadre de cette étude. Quoi qu'il en soit, si les difficultés de compréhension des concepts d'équilibre et de stabilité n'empêchent pas les futurs ingénieurs d'être totalement opérationnels, on peut inférer certaines difficultés de l'ordre de la « perte de temps », du tâtonnement, lors de l'étude et de la conception de systèmes de contrôle en milieu professionnel.

5. C'est une des premières représentations « entré-sortie » d'un système, basée sur un quotient de polynômes.

6. Valeur fournie par un test de corrélation de Pearson, qui montre une significativité forte avec un $p = 3,6 \cdot 10^{-11}$.

Perspectives

Comme nous l'avons vu, les conceptions misent à jour lors de la première partie semblent s'être formées tout au long de la scolarité des élèves qui deviendront les futurs étudiants d'université et d'école d'ingénieur. Il n'est pas surprenant qu'elles soient fortement enracinées dans leur esprit et qu'il soit difficile de les transformer, principalement dans les dernières étapes de leur parcours de formation.

Mais alors, ne pourrait-on pas agir avant qu'ils n'arrivent dans l'enseignement supérieur ? Plusieurs pistes sont apparues au cours de nos investigations sur l'enseignement de ces concepts depuis l'école primaire jusqu'au lycée. En fait, il semble possible d'agir à tous les niveaux de formation et dans tous les domaines concernés.

On pense d'abord à l'utilisation de la balance à l'école primaire. Il semble important de constater qu'un parallèle avec l'histoire des sciences est envisageable : après deux mille ans d'étude de la balance (jusqu'au XVI^e siècle) la compréhension de son fonctionnement n'est pas venue du stricte cadre statique de la loi des leviers. Sans faire de raccourcis hâtifs, il apparaît néanmoins que c'est un point qui mérite d'être examiné de près : En quoi l'étude de la balance, axée sur l'unique « découverte » de la loi des leviers, comme cela se pratique à l'école primaire, est-elle nécessaire à la construction du concept d'équilibre ? Ceci, est à étudier bien sûr en relation avec les obstacles conceptuels que nous avons soulevés, comme beaucoup de chercheurs anglo-saxons à son encontre, comme l'identification équilibre/horizontal.

Le lien avec les autres disciplines dans lesquelles la compréhension de l'équilibre par les élèves a déjà été étudiée, par exemple en chimie (Kermen & Méheut, 2009), est à considérer sérieusement. Pour cela, on pourrait avantageusement étudier des interventions didactiques à l'école primaire ou au collège, basées sur le développement de *modèles précurseurs* (Ravanis et al., 2007), s'appuyant notamment sur notre approche « évolutionniste », non en parallèle de l'approche classique mais plutôt en coordination avec elle. Ceci permettrait, dans chaque discipline, le recours aux critères spécifiques, vus comme une déclinaison de cette approche, une conséquence de la définition « évolutionniste ».

Ceci pourrait éviter le morcellement des connaissances de ces concepts en fournissant une base pluridisciplinaire à partir de laquelle l'élève pourrait créer des liens dans chaque discipline, avec le développement d'un lexique approprié et spécifique (avec l'introduction du terme *stationnaire*, par exemple, au lieu d'*équilibre*).

Références

- Albanese, A., Danhoni Neves, C. M., & Vicentini, M. (1998). Students' ideas about equilibrium, friction and dissipation. *Acta Scientarium*, 20(4), 461–472.
- Anderson, J. R. (1982). Acquisition of cognitive skill. *Psychological Review*, 89(4), 369–406. Consulté sur <http://content.apa.org/journals/rev/89/4/369>
doi: 10.1037/0033-295X.89.4.369
- Artigue, M. (1988). Ingénierie didactique. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 9(3), 281–308.
- Artigue, M. (2002). Ingénierie didactique : quel rôle dans la recherche aujourd'hui ? *Les Dossiers des sciences de l'éducation*(8), 59–72.
- Ausubel, D. P. (1969, octobre). A cognitive theory of school learning. *Psychology in the Schools*, 6(4), 331–335.
- Bachelard, G. (1934). *La formation de l'esprit scientifique. Contribution à une psychanalyse de la connaissance objective*. (J. Vrin, Ed.). Paris.
- Beauzamy, B. (2011). *Les textes mathématiques d'Archimède*.
- Bennett, S. (1979). *A history of control engineering 1800-1930*. London : Peter Pergrinus Ltd.
- Bennett, S. (1993). *A history of control engineering 1930-1959*. London : Peter Pergrinus Ltd.
- Bermúdez, J. L. (2012). *Cognitive Science : an introduction to the science of the mind* (3rd éd.). Cambridge University Press.
- Best, J. W., & Kahn, J. V. (1998). *Research in Education*. Needham Heights : Allyn and Bacon.
- Black, H. S. (1934). Stabilized Feedback Amplifiers. *The Bell System Technical Journal*.
- Bloch, I. (2005). *Quelques apports de la théorie de situations à la didactique des mathématiques dans l'enseignement secondaire et supérieur. Note de synthèse pour une Habilitation à Diriger des Recherches* (Thèse de doctorat non publiée). Paris Diderot Paris 7.
- Bonawitz, E. B., Lim, S., & Schulz, L. E. (2007). Weighing the evidence : Children ' s naïve theories of balance affect their exploratory play. In *28th annual proceedings of*

- the cognitive science society*. Nashville, Tennessee : Lawrence Erlbaum Associates.
- Braver, M. C. W., Braver, S. L., & Meta-analysis, S. (1988). Statistical Treatment of the Solomon Four-Group Design : A Meta-Analytic Approach. *Psychological Bulletin*, 104(1), 150–154.
- Brewer, W. F., & Lambert, B. L. (1993). The Theory-Ladenness of Observation and the Theory-Ladenness of the Rest of the Scientific Process. In *Proceedings of the fifteenth annual conference of the cognitive science society* (pp. 254–259). Hillsdale, New Jersey.
- Brousseau, G. (1998). *La théorie des situations didactiques* (La pensée éd.). Grenoble.
- Buchs, C., Butera, F., Mugny, G., & Darnon, C. (2004, février). Conflict Elaboration and Cognitive Outcomes. *Theory Into Practice*, 43(1), 23–30. doi: 10.1207/s15430421tip4301_4
- Campbell, D. T., & Stanley, J. C. (1963). Handbook of Research on Teaching. In *Experimental and quasi-experimental designs for research* (p. 88). Houghton Mifflin Company.
- Canu, M., de Hosson, C., & Duque, M. (2014, août). STUDENTS' UNDERSTANDING OF EQUILIBRIUM AND STABILITY : THE CASE OF DYNAMIC SYSTEMS. *International Journal of Science and Mathematics Education*, ?(?). Consulté sur <http://link.springer.com/10.1007/s10763-014-9565-6> doi: 10.1007/s10763-014-9565-6
- Carnot, L. (1803). *Principes fondamentaux de l'équilibre et du mouvement*, Ch.2. Paris.
- CGE. (2012). *Les voies d'accès aux grandes écoles de la CGE : diversité des origines et des profils* (Rapport technique). Paris : Conférence des Grandes Ecoles.
- Champagne, A. B., & Bunce, D. M. (1985). Learning-Theory-based Science Teaching. In S. M. Glynn, R. H. Yeany, & B. K. Britton (Eds.), *The psychology of learning science* (p. 28).
- Chi, M. (1993). Barriers to conceptual change in learning science concepts : A theoretical conjecture. In *Proceedings of the fifteenth annual conference of the cognitive science society*. Boulder, CO : Institute of Cognitive Science.
- Chi, M. T. H. (2008). Three types of conceptual change : Belief revision, mental model transformation, and categorical shift. In S. Vosniadou (Ed.), *Handbook of research on conceptual change* (pp. 61–82). New York : Routledge.
- Chi, M. T. H., Feltovich, P. J., & Glaser, R. (1981, avril). Categorization and Representation of Physics Problems by Experts and Novices*. *Cognitive Science*, 5(2),

- 121–152. doi: 10.1207/s15516709cog0502_2
- Coelho, R. L. (2009, janvier). On the Concept of Force : How Understanding its History can Improve Physics Teaching. *Science & Education*, 19(1), 91–113. Consulté sur <http://link.springer.com/10.1007/s11191-008-9183-1> doi: 10.1007/s11191-008-9183-1
- Cohen, L., Manion, L., & Morrison, K. (2007). *Research Methods in Education* (6th éd.). New York : Routledge.
- de Hosson, C. (2005). *Contribution à l'analyse des interactions entre histoire et didactique des sciences : élaboration d'un support d'enseignement du mécanisme optique de la vision pour l'école primaire et le collège et premiers éléments d'évaluation* (Thèse de doctorat non publiée). Paris Diderot Paris 7.
- de Hosson, C. (2011a). *L'histoire des sciences, un laboratoire pour la recherche en didactique et l'enseignement de la physique* (Thèse de doctorat non publiée). Paris Diderot Paris 7.
- de Hosson, C. (2011b). Una controversia historica al servicio de una situacion de aprendizaje : una reconstruccion didactica basada en "dialogo sobre los dos maximos sistemas del mundo" de Galileo. *Ensenanza de las Ciencias*, 29(1), 115–126.
- de Jong, T., & Ferguson-Hessler, M. G. (1996). Types and Qualities of Knowledge. *Educational Psychologist*, 31(2), 105–113.
- DEPP. (2008). *Disparités d'accès et parcours en classes préparatoires* (Rapport technique). Paris : Ministère de l'Education Nationale.
- DiSessa, A. A. (1993). Towards an epistemology of physics. *Cognition and Instruction*, 10(2-3), 105–225.
- DiSessa, A. A. (2002). Why "Conceptual Ecology" is a Good Idea. In *Reconsidering conceptual change : Issues in theory and practice* (pp. 28–60). Springer Netherlands. doi: 10.1007/0-306-47637-1_2
- Doise, W., & Mugny, G. (1981). *Le développement social de l'intelligence* (IntereEdit éd.). Paris.
- Dorier, J.-L. (2000, octobre). Recherche en Histoire et en Didactique des Mathématiques sur l'Algèbre linéaire – Perspectives théorique sur leurs interactions. *Les cahiers du laboratoire Leibniz*(12).
- Douady, R. (1994). Ingénierie didactique et évolution du rapport au savoir. *Repères IREM*, 15, 1–25.
- Duhem, P. (1905a). *Les origines de la statique, tome I* (A. Hermann, Ed.). Paris : A.

- Hermann.
- Duhem, P. (1905b). *Les origines de la statique, tome II* (A. Hermann, Ed.). Paris.
- Duit, R. (1999). Conceptual Change Approaches in Science Education. In W. Schnotz, S. Vosniadou, & M. Carretero (Eds.), *New perspective in conceptual change* (pp. 263–282). Oxford : Pergamon.
- Ericsson, K. A., & Simon, H. A. (1980). Verbal reports as data. *Psychological Review*, 87(3), 215–251. Consulté sur <http://content.apa.org/journals/rev/87/3/215> doi: 10.1037/0033-295X.87.3.215
- Fauconnet, S. (1981). *Etude de résolution de problèmes : quelques problèmes de même structure en physique* (Thèse de doctorat non publiée). Paris Diderot- Paris 7.
- Flores-García, S., Alfaro-Avena, L. L., Chávez-Pierce, J. E., Luna-González, J., & González-Quezada, M. D. (2010). Students' difficulties with tension in massless strings. *American Journal of Physics*, 78(12), 1412.
- Friston, K. J., & Stephan, K. E. (2007). Free-energy and the brain. *Synthese*, 159(3), 417–458. doi: 10.1007/s11229-007-9237-y.Free-energy
- Gazanniga, M. S., Ivry, R., & George R. Mangun. (2008). *Cognitive Neuroscience : The Biology of the Mind* (3rd éd.). W. W. Norton & Co. Inc.
- Guitard, E. H. (1934). Histoire de la pharmacie. *Revue d'Histoire de la Pharmacie*.
- Gunstone, R. F. (1987). Student understanding in mechanics : A large population survey. *American Journal of Physics*, 55(8), 691–696.
- Gunstone, R. F., & White, R. T. (1981, juillet). Understanding of gravity. *Science Education*, 65(3), 291–299. Consulté sur <http://doi.wiley.com/10.1002/sce.3730650308> doi: 10.1002/sce.3730650308
- Heath, T. L. (1897). *The works of Archimedes* (Cambridge éd.; C. J. Clay, Ed.). London.
- Heiberg, J. L. (1913). De Planorum Aequilibriis. In *Archimedis opera omnia cum commentariis evtocii* (pp. 125–213).
- Herl, H. E., O'Neil, H. F. O., Chung, G. K. W. K., Bianchi, C., Wang, S.-I., Mayer, R., ... Tu, A. (1999). *Final Report for Validation of Problem-Solving Measures* (Vol. 1522; Rapport technique N° 310). Los Angeles : National Center for Research on Evaluation, Standards and Students Testing.
- Inhelder, B., & Piaget, J. (1955). *De la logique de l'enfant à la logique de l'adolescent : essai sur la construction des structures opératoires formelles*. PUF.
- Isaza Delgado, J. F., & Campos Romero, D. (2006). *Ecología : una mirada desde los*

- sistemas dinámicos* (Editorial éd.). Bogotá.
- Kariotoglou, P., Spyrtou, A., & Tselfes, V. (2009). How student teachers understand distance force interactions in different contexts. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 7(November 2008), 851–873.
- Kempa, R. F. (1991). Students' learning difficulties in science. Causes and possible remedies. *Enseñanza de las Ciencias*, 9(2), 119–128.
- Kermen, I., & Méheut, M. (2009). Different models used to interpret chemical changes : analysis of a curriculum and its impact on French students' reasoning. *Chemistry Education Research and Practice*, 10(1), 24. Consulté sur <http://xlink.rsc.org/?DOI=b901457h> doi: 10.1039/b901457h
- Kuhn, T. S. (1962). *The Structure of Scientific Revolutions*. University of Chicago Press.
- Kuzniak, A. (2004). La théorie des situations didactiques de Brousseau. *L'Ouvert*, 110, 17–33.
- Laguerre, E. (2005). *Une ingénierie Didactique pour l'Apprentissage du Théorème de Thalès en Quatrième* (Thèse de doctorat non publiée). Université Paris Diderot Paris 7.
- Lemeignan, G., & Weil-Barais, A. (1993). *Construire des concepts en physique*. Paris : Hachette Education.
- Lewis, F. L. (1992). A brief history of feedback control. In *Applied optimal control and estimation* (pp. 1–29). Rentice-Hall.
- López-moliner, J., Maiche, A., & Estaún, S. (2003). Perception of acceleration in motion-in-depth with only monocular and both monocular and binocular information. *Psicológica*, 24, 93–108.
- Lyapunov, A. M. (1992, mars). The general problem of the stability of motion. *International Journal of Control*, 55(3), 531–534. doi: 10.1080/00207179208934253
- Mäntylä, T. (2012, mai). Didactical Reconstruction of Processes in Knowledge Construction : Pre-service Physics Teachers Learning the Law of Electromagnetic Induction. *Research in Science Education*, 42(4), 791–812. doi: 10.1007/s11165-011-9217-6
- Mathieu, J.-P., Kastler, A., & Pierre, F. (1991). *Dictionnaire de physique* (3e éd.; Eyrolles, Ed.). Paris : Masson.
- Maxwell, J. C. (1868). On governors. *Proceedings of the Royal Society*, 16(100), 12.
- Mayr, O. (1970). *The Origins of Feedback Control*. Washington, D.C. : MA : MIT Press.

- Minstrell, J. (1982). Explaining the "at Rest" condition of an object. *The Physics Teacher*, 20(1), 10–14.
- Minstrell, J. (1992a). *Facet of Student's Thinking*. Consulté sur <http://depts.washington.edu/huntlab/diagnoser/facetcode.html>
- Minstrell, J. (1992b). Facets of students' knowledge and relevant instruction. In R. Duit, F. Goldberg, & H. Niedderer (Eds.), *Research in physics learning : Theoretical issues and empirical studies* (pp. 110–128). Kiel : IPN.
- Minstrell, J. (2000). Student Thinking and Relative Assessment : Creating a Facet-Base Learning Environment. In N. Raju, J. Pellegrino, M. Bertenthal, K. Mitchell, & L. Jones (Eds.), *Grading the nation's report card : Research from the evaluation of naep* (pp. 44–73). Washington, D.C. : National Academy Press.
- Moreira, M. A., & Greca, I. M. (2003). Cambio conceptual : Análisis crítico y propuesta a la luz de la teoría del Conceptual Change : critical analysis and proposals in the light of the meaningful learning theory. *Ciência & Educação*, 9(2), 301–315.
- Municio Pozo, J. I., & Gómez Crespo, M. A. (1998). *Aprender y enseñar ciencia. Del conocimiento cotidiano al conocimiento científico* (5^e éd. ; Javier Morata, Ed.). Madrid.
- Newcomer, L. J., & Steif, S. P. (2008). Student Thinking about Static Equilibrium : Insights from Written Explanations to a Concept Question. *Journal of Engineering Education*, 481–490.
- Novak, J. D. (2002, juillet). Meaningful learning : The essential factor for conceptual change in limited or inappropriate propositional hierarchies leading to empowerment of learners. *Science Education*, 86(4), 548–571. Consulté sur <http://doi.wiley.com/10.1002/sce.10032> doi: 10.1002/sce.10032
- Nyquist, H. (1932). Regeneration Theory. *The Bell System Technical Journal*.
- Orange, C. (2007). Quel Milieu pour l'apprentissage par problématisation en sciences de la vie et de la terre? *Education & Didactique*, 1(2), 37–56. Consulté sur <http://educationdidactique.revues.org/152>
- Ortiz, L. G., Heron, P. R. L., & Shaffer, P. S. (2005). Student understanding of static equilibrium : Predicting and accounting for balancing. *American Journal of Physics*, 73(6), 545–553. doi: 10.1119/1.1862640
- Packard, A., Poolla, K., & Horowitz, R. (2002). *Dynamic Systems and Feedback Class Notes for ME 132*. Consulté sur <http://www.cds.caltech.edu/~murray/courses/cds101/fa02/caltech/pph.html>

- Patrice Remaud. (2004). *Une histoire de la genèse de l'automatique en France 1850-1950 De l'école de la régulation française au début du XXe siècle à l'émergence de l'automatique en France après la seconde guerre mondiale* (Thèse de doctorat non publiée). Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris.
- Pedrerros Martínéz, R. I. (2013). Significados de la Palabra Equilibrio en los Estudiantes de Primer Semestre de las Licenciaturas de Física, Diseño Tecnológico, Biología y Química. *EDUCyT*, 7(2), 66–77.
- Philippe, J. (2004). La transposition didactique en question : pratiques et traduction. *Revue française de pédagogie*, 149(1), 29–36. Consulté sur http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/rfp_0556-7807_2004_num_149_1_3170 doi: 10.3406/rfp.2004.3170
- Piaget, J. (1931). Le développement Intellectuel Chez les Jeunes Enfants. *Mind*, 40(158), 137–160.
- Piaget, J. (1936). *La naissance de l'intelligence chez l'enfant* (Delachaux et Niestlé, Ed.). Paris.
- Piaget, J. (1960). *The psychology of intelligence*. Littlefield Adam & Co.
- Piaget, J., & Fluckiger-Geneux, I. (1972). La traction et l'équilibre des plaques. In *La direction des mobiles lors de chocs et de poussées* (pp. 193–215). Paris : Presses Universitaires de France.
- Piaget, J., & Garcia, R. (1971). *Les explications causales*. Paris : Presses Universitaires de France.
- Poinsot, L. (1873). *Eléments de Statique* (G. Villars, Ed.). Paris.
- Posner, G. J., & Strike, K. A. (1992). A Revisionist Theory of Conceptual Change. In *Philosophy of science, cognitive psychology, and educational theory and practice* (p. 147). New York : State University of New York Press.
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., & Gertzog, W. A. (1982, avril). Accommodation of a scientific conception : Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66(2), 211–227. Consulté sur <http://doi.wiley.com/10.1002/sce.3730660207> doi: 10.1002/sce.3730660207
- Pozo, J. I., del Puy Pérez, M., Sanz, A., & Limón, M. (1992, avril). Las ideas de los alumnos sobre la ciencia como teorías implícitas. *Infancia y Aprendizaje*(57), 3–22. doi: 10.1080/02103702.1992.10822321
- Rajamani, R. (2006). *Vehicle Dynamics and Control*. Springer. Consulté sur <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=N0cVzjChUccC&pgis=1>

- Ravanis, K. (2010). Obstacles et Médiation-Tutelle : concepts-clés pour la construction des connaissances du monde physique à l'âge de 5-7 ans. *Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias*, 5(2), 1–12.
- Ravanis, K., Koliopoulos, D., & Boilevin, J.-M. (2007, septembre). Construction of a Precursor Model for the Concept of Rolling Friction in the Thought of Preschool Age Children : A Socio-cognitive Teaching Intervention. *Research in Science Education*, 38(4), 421–434. Consulté sur <http://link.springer.com/10.1007/s11165-007-9056-7> doi: 10.1007/s11165-007-9056-7
- Reeve, J. (2012). A Self-determination Theory Perspective on Student Engagement. In S. L. Christenson, A. L. Reschly, & C. Wylie (Eds.), *Handbook of research on student engagement* (pp. 149–172). Boston, MA : Springer US. Consulté sur <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4614-2018-7> doi: 10.1007/978-1-4614-2018-7
- Renn, J., & Damerow, P. (2012a). Facsimile of Benedetti's Chapter on Mechanics. In J. Renn, R. Schlögl, & B. F. Schutz (Eds.), *The equilibrium controversy. guidobaldo del monte's critical notes on the mechanics of jordanus and benedetti and their historical and conceptual background* (Open Acces éd., pp. 337–386). Berlin, Germany : Max Planck Institute for the History of Science.
- Renn, J., & Damerow, P. (2012b). Facsimile of Jordanus' Treatise. In J. Renn, R. Schlögl, & B. F. Schutz (Eds.), *The equilibrium controversy. guidobaldo del monte's critical notes on the mechanics of jordanus and benedetti and their historical and conceptual background* (Open Acces éd., pp. 303–336). Berlin, Germany : Max Planck Institute for the History of Science.
- Renn, J., & Damerow, P. (2012c). On the Book and the Handwritten Marginalia. In J. Renn, R. Schlögl, & B. F. Schutz (Eds.), *The equilibrium controversy. guidobaldo del monte's critical notes on the mechanics of jordanus and benedetti and their historical and conceptual background* (Open Acces éd., p. 302). Berlin, Germany : Max Planck Institute for the History of Science.
- Roegiers, X. (2001). *Une pédagogie de l'intégration : compétences et intégration des acquis dans l'enseignement*. Paris : De Boeck.
- Ruiz-Primo, M. A., & Shavelson, R. J. (1996, août). Problems and issues in the use of concept maps in science assessment. *Journal of Research in Science Teaching*, 33(6), 569–600. Consulté sur [http://doi.wiley.com/10.1002/\(SICI\)1098-2736\(199608\)33:6<569::AID-TEA1>3.0.CO;2-M](http://doi.wiley.com/10.1002/(SICI)1098-2736(199608)33:6<569::AID-TEA1>3.0.CO;2-M) doi: 10.1002/

- (SICI)1098-2736(199608)33:6<569::AID-TEA1>3.0.CO;2-M
- Ryan, R., & Deci, E. (2000, janvier). Intrinsic and Extrinsic Motivations : Classic Definitions and New Directions. *Contemporary educational psychology*, 25(1), 54–67. Consulté sur <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10620381> doi: 10.1006/ceps.1999.1020
- Saltiel, E. (1978). *Concepts cinématiques et raisonnements naturels : étude de la compréhension des changements de référentiels galiléens par les étudiants en sciences* (Thèse d'état). Université Paris IV.
- Scallon, G. (2004). *L'évaluation des apprentissages dans une approche par compétences* (De Boeck, Ed.). Paris.
- Schacter, D. L. (1987). Implicit memory : History and current status. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, 13(3), 501–518. Consulté sur <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/0278-7393.13.3.501> doi: 10.1037//0278-7393.13.3.501
- Sensevy, G. (1998). *Institutions didactiques. Etude et autonomie à l'école élémentaire* (PUF éd.). Paris.
- Serway, R. A., & Beichner, R. J. (2000). *Physics for scientists and engineers* (5^e éd.). Orlando, Florida : Harcourt College Publishers.
- Shavelson, R. J. (1974, septembre). Methods for examining representations of A subject-matter structure in a student's memory. *Journal of Research in Science Teaching*, 11(3), 231–249. Consulté sur <http://doi.wiley.com/10.1002/tea.3660110307> doi: 10.1002/tea.3660110307
- Shavelson, R. J., Ruiz-Primo, M. A., & Wiley, E. W. (2005, juin). Windows into the mind. *Higher Education*, 49(4), 413–430. doi: 10.1007/s10734-004-9448-9
- Siegler, R. S., & Chen, Z. (2002, mai). Development of rules and strategies : balancing the old and the new. *Journal of experimental child psychology*, 81(4), 446–57. Consulté sur <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11890730> doi: 10.1006/jecp.2002.2666
- Singh, P., Lin, T., Mueller, E. T., & Lim, G. (2002). Open Mind Common Sense : Knowledge Acquisition from the General Public. In *On the move to meaningful internet systems 2002 : Coopis, doa, and odbase* (pp. 1223–1237). doi: 10.1007/3-540-36124-3_77
- Smith, B. (1995, novembre). Formal ontology, common sense and cognitive science. *International Journal of Human-Computer Studies*, 43(5-6), 641–667. Consulté sur

- <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1071581985710671> doi: 10.1006/ijhc.1995.1067
- Solaz-Portolés, J., & López, V. (2003). Types of knowledge and their relations to problem solving in science : directions for practice. *Sísifo Educational Sciences Journal*, 6, 105–112.
- Solaz-portolés, J. J., & López Sanjosé, V. (2008). Conocimiento previo, modelos mentales y resolución de problemas : Un estudio con alumnos de bachillerato. *Revista Electrónica de Investigación Educativa*, 10(1), 1–17.
- Solomon, R. L. (1949). An extension of control group design. *Psychological Bulletin*, 46, 137–150.
- Stevin, S., Diophante, & Maurice. (1634). *Les oeuvres mathematiques de Simon Stevin ... , ou sont inserées les Memoires mathematiques, esquelles s'est exercé le ... prince Maurice de Nassau. Le tout reveu, corrigé, augmenté par Albert Girard ...* (A. Girard, A. Elzevier, & B. Elzevier, Eds.). Leyde. doi: 10.3931/e-rara-8933
- Sun, R. (1994). *Integrating rules and connectionism for robust commonsense reasoning*. New York : John Wiley & Sons, Inc.
- Tamayo, F. J., Canu, M., & Duque, M. (2012). Didactic engineering applied to control system learning : equilibrium and stability concepts in the ball and beam experiment. In *Active learning in engineering education*.
- Tiberghien, A. (2002). *Des connaissances naïves au savoir scientifique* (Rapport technique). Lyon : Université Lumière Lyon 2.
- Treagust, D. F., & Duit, R. (2008). Teaching Science for Conceptual Change : Theory and Practice. In S. Vosniadou (Ed.), *International handbook of research on conceptual change* (Vol. 3, pp. 629–646).
- Varignon, P. (1725). *Nouvelle Mécanique ou Statique, dont le projet fut donné en 1687, Tome 2* (Jombert, C éd.). Paris.
- Vergnaud, G. (1990). La théorie des champs conceptuels. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 10(23), 133–170.
- Vergnaud, G., Halbwachs, F., & Rouchier, A. (1978). Structure de la matière enseignée, histoire des sciences et développement conceptuel chez l'élève. *Revue Française de Pédagogie*, 45, 7–15.
- Vickers, J. (2014). The Problem of Induction. In E. N. Zalta (Ed.), *The stanford encyclopedia of philosophy* (Summer 201 éd.).
- Victorri, B. (1996). *La polysémie. Construction dynamique du sens* (Hermes Sci éd.).

RÉFÉRENCES

- Viennot, L. (1979, janvier). Spontaneous Reasoning in Elementary Dynamics. *European Journal of Science Education*, 1(2), 205–221. doi: 10.1080/0140528790010209
- Viennot, L. (1996). *Raisonnement en physique : la part du sens commun*. De Boeck.
- Von Bertalanffy, L. (1969). *General System Theory : Foundations, Development, Applications* (Revised éd.). George Braziller, Inc.
- Vosniadou, S., Ioannides, C., Dimitrakopoulou, A., & Papademetriou, E. (2001). Designing learning environments to promote conceptual change in science. *Learning and Instruction*, 11, 381–419.
- Vygotsky, L. (1978). *Interaction between learning and development* (Harvard Un éd.).
- Wallon, H. (1945). *Les origines de la pensée chez l'enfant* (Presses Un éd.). Paris.
- Wiener, N. (1948). *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. New York : John Wiley & Sons, Inc.
- Zimmermann-Asta, M.-L. (1997, juillet). La perturbation conceptuelle : Outil pour dépasser les obstacles. *Aster*(25). Consulté sur <http://hdl.handle.net/2042/8684> doi: 10.4267/2042/8684

RÉFÉRENCES

Annexes

Lexicographie

A.1 Lexicographie du mot *équilibre*

Le CNRTL, nous dit à propos du substantif masculin *équilibre* :

A.

— Usuel.

1. **Attitude ou position stable** (généralement verticale pour le corps humain) d'un corps ou d'un objet dont le poids est partagé également des deux côtés d'un point d'appui, de sorte que ce corps ou cet objet ne bascule ni d'un côté ni de l'autre. Manquer d'équilibre, rattraper son équilibre ; sens, troubles de l'équilibre. Synon. aplomb, assiette. Transformer une carrière et une forêt, en édifice, en équilibres magnifiques (Valéry, Eupalinos, 1923, p. 137). Ses mains s'activèrent pour rétablir l'équilibre de son petit chapeau (Roy, Bonheur occas., 1945, p. 93).

— P. métaph.

La dame continuait à tenir en équilibre instable son sourire (Proust, Guermantes 2, 1921, p. 424) :

- 1. ... il [Fiodor] aura mis la maison sens dessus dessous. D'ailleurs, pauvre maison, elle est toujours sens dessus dessous... Telle est la nature de son équilibre, on n'arrivera pas à la mettre d'aplomb tout-à-fait, c'est une habitude à prendre. Je finirai par marcher exprès la tête en bas... Bernanos, Joie, 1929, p. 672.

— Locutions

- adv. En équilibre, plus rarement d'équilibre. **Dans une position parfois difficile, précaire, mais stable.** Quartiers de rochers en équilibre sur leurs angles (Jouy, Hermite, t. 2, 1812, p. 360). L'impossibilité physique, (...) de mettre un cône pesant en équilibre sur sa pointe, quoique l'équilibre soit mathématiquement possible (Cournot, Fond. connaiss., 1851, p. 44). Femmes qui portent une cruche d'argile en équilibre au-dessus du front (Benda, Trahis. clercs, 1927, p. 299). V. chavirer A 2, cit. de Musset :

- 2. Les nageoires pectorales et ventrales ne paroissent pas être d'un grand usage dans le mouvement progressif des poissons ; mais ils s'en servent pour se tenir en équilibre et en repos, en les étendant chaque fois qu'il faut corriger une vacillation. Cuvier, Anat. comp., t. 1, 1805, p. 507.

● verbale. **Perdre l'/son équilibre. Pencher exagérément d'un côté, au risque de tomber.** Il perdit l'équilibre, faillit s'étaler (Zola, Terre, 1887, p. 66). L'ivrogne, perdant l'équilibre, oscillait sur sa chaise (Maupass., Contes et nouv., t. 2, Champ d'oliv., 1890, p. 97).

— En partic., domaine du spectacle. Dans une attraction de cirque ou de music-hall, performance d'une personne (parfois d'un animal) réussissant à se tenir ou à faire tenir des objets dans cette position. (Quasi-)synon. acrobatie. Tour d'adresse des jongleurs et (...) équilibres des funambules (Chateaubr., Polém., 1818-27, pp. 319-320). Faire des tours d'équilibre avec une queue de billard et deux boules (Flaub., Bouvard, t. 1, 1880, p. 5).

● P. métaph. [Mr Balfour] parvint, par des prodiges d'équilibre, à se maintenir encore toute une année sur la corde raide (Maurois, Édouard VII, 1933, p. 169). J'abordai cette carrière inconfortable où je suis, m'engageant avec innocence sur un fil d'équilibre où j'avance péniblement (Camus, Env. et endr., 1937, p. 14).

2. P. anal. ou au fig.

a) Juste rapport, proportion harmonieuse entre des éléments opposés ou convenable pondération des parties d'un ensemble ; p. méton. état de stabilité qui en résulte. Équilibre harmonieux, heureux, parfait, précaire ; juste, nouvel équilibre ; équilibre des traits. Plus que la rareté de chacun des détails, il goûtait l'équilibre de leur ensemble, l'harmonie, l'ordre, le mariage de cette riche diversité (Barrès, Cahiers, t. 3, 1904, p. 247). Tout commerce entre deux humains est un difficile équilibre (Montherl., Célibataires, 1934, p. 894). V. bride ex. 3 :

- 3. Il faut donc conclure que la réalité consiste en un état d'équilibre entre deux forces, dont l'une tend à disjoindre et à diviser sans cesse le continu et l'homogène, dont l'autre s'oppose à ce travail de disjonction, s'efforce de maintenir assemblés, de soustraire à la possibilité d'une division nouvelle les états fragmentaires déterminés déjà par la force adverse parmi la trame du continu. Gaultier, Bovarysme, 1902, p. 273.

- 4. En remontant chez moi pour y passer la soirée à travailler de mon mieux, je me

disais que le monde n'est pas construit pour l'équilibre. Le monde est désordre. L'équilibre n'est pas la règle, c'est l'exception. Et je faisais le serment de travailler pour l'ordre et l'équilibre. Duhamel, *Les Maîtres*, 1937, p. 167.

- Faire équilibre. Opposer une force morale ou une personne à une autre pour la contrebalancer. Synon. faire contrepoids. [L'aristocratie] a fait équilibre à la royauté ; elle a été contrepoids (Hugo, *Homme qui rit*, t. 3, 1869, p. 127). Compter sur Giraud pour faire équilibre à de Gaulle (De Gaulle, *Mém.* 1956, p. 161).

Rem. On rencontre, notamment ds le domaine esthétique, un emploi péj. dans lequel l'équilibre est conçu comme un état statique en conflit avec la transgression créatrice de l'artiste. La beauté ne saurait naître que d'un déséquilibre, et elle évite l'équilibre, lequel engendre la mort (Cocteau, *Poés. crit.* I, 1959, p. 121).

b) En partic.

— Domaines de l'activité intellectuelle et psychique

- Domaines intellectuel et moral. État du cœur et de l'esprit quand aucun trouble intérieur ou extérieur ne gêne leur fonctionnement normal. Équilibre intérieur, intellectuel, moral ; (re)trouver son équilibre. Synon. calme, sérénité, tranquillité. Une santé d'esprit, un équilibre de toutes ses facultés, qui lui causait une volupté physique (Rolland, *J.-Chr., Matin*, 1904, p. 210). Cet équilibre physique et moral qu'elle avait mis des années à conquérir (Martin du G., *Thib., Été 14*, 1936, p. 174). V. conflit ex. 6.

- Domaine psychique. État de psychisme dont la structure et le fonctionnement ne sont gênés par aucun trouble intérieur ; « Caractère harmonieux, sans prédominance aucune, sans névrose » (Ancelin 1971). (Quasi-) synon. bon sens, raison. Anton. démence, folie. Cet équilibre que nous appelons la raison (Joubert, *Pensées*, t. 1, 1824, p. 210). Un acte qui fait douter de ton équilibre (Jammes, *Corresp.[avec Gide]* ds Claudel-Gide, *Corresp.* 1899-1926, p. 227).

— Domaine des arts et des lettres

- ARTS PLASTIQUES et MUS. Répartition heureuse, distribution harmonieuse de la composition d'une œuvre. Tel est l'équilibre du nu sculpté qu'il n'y a plus de centre, mais que chaque partie obéit à toutes (Alain, *Beaux-arts*, 1920, p. 233). Sobre majesté des parfaits équilibres du Poussin (Lhote, *Peint. d'abord*, 1942, p. 80). Cette espèce [de contrepoint, à savoir le fleuri] est très facile à écrire si l'on n'a cure de rythmes harmonieux, et si l'on procède au hasard sans se soucier de l'équilibre des rythmes ni de la musicalité de l'ensemble (Koechlin, *Règles contrepoint*, 1926, p. 41).
- LITT. Qualité d'un ouvrage, d'un style, d'une expression, résultant de l'agencement

heureux de la composition ou d'une parfaite maîtrise des possibilités de la langue. Fixer par ce chef-d'œuvre [Les Provinciales] l'équilibre de la prose française (Sainte-Beuve, Port-Royal, t. 1, 1840, p. 122).

B.— Emplois spéc.

1. SC. DE LA NATURE

a) MÉCAN. et **PHYS.** Fait, pour plusieurs forces ou actions agissant sur un système, de se contrebalancer exactement, ne modifiant en rien son état de repos ou de mouvement ; p. méton. situation d'un système soumis à ces forces ou actions et qui reste dans l'état. Anton. déséquilibre. Balance dont les deux plateaux sont en équilibre (Du Camp, Hollande, 1859, p. 38). Déterminer les conditions d'équilibre d'un corps soumis à diverses forces de contact (F. Perrin, Dyn. relativ., 1932, p. 4). V. accélération ex. 12 :

- 5. La propriété principale de l'équilibre qui constitue un corps est l'élasticité. Elle dépend d'un état de tension qui se produit et s'établit de proche en proche, entre les molécules liées qui viennent à subir une action extérieure, choc, pression ou traction, tant que des limites, d'ailleurs très-variables, ne sont pas dépassées. Renouvier, Essais crit. gén., 3e essai, 1864, p. 57.
- 6. ... pour un physicien la place qu'occupe la plus petite balle de sureau s'explique par le conflit ou l'équilibre de lois d'attraction et de répulsion qui gouvernent des mondes bien plus grands. Proust, Prisonn., 1922, p. 213.

● Équilibre stable. Équilibre qui tend à se rétablir spontanément lorsqu'il est légèrement troublé. Anton. équilibre instable, non stable. L'équilibre est stable dans les positions où le centre de gravité du système est le plus bas, et l'équilibre n'est pas stable, dans les positions où ce centre est le plus haut (Poisson, Mécan., t. 2, 1811, p. 299).

— P. métaph. Quatre-vingts ministres essayèrent en vain de tenir en équilibre la bascule royale (Vigny, Mém. inéd., 1863, p. 76).

— **PHYS. NUCL.** Équilibre radioactif. « État atteint par une substance radioactive dont la désintégration donne un nouveau produit radioactif, lorsque le nombre d'atomes formé pendant chaque intervalle de temps est égal au nombre d'atomes disparus » (Uv.-Chapman 1956). Courbe obtenue avec le radium en équilibre radioactif (Mme P. Curie, Radioactiv., t. 2, 1910, p. 109).

SYNT. Équilibre des forces, d'un système ; point, position, rétablissement, rupture d'équilibre ; assurer, chercher, conserver, détruire, maintenir, réaliser, troubler l'équilibre.

b) CHIM. et **THERMODYNAMIQUE.** « État d'un corps ou d'un système de corps qui

dépendent des conditions de leur milieu (température, pression, etc.) d'une façon telle qu'à chaque état défini de ces conditions, appelées facteurs de l'équilibre, corresponde un état déterminé et toujours le même du corps ou du système considérés, quel que soit le sens dans lequel s'est effectuée la variation du milieu » (Lal. 1968). Équilibre de température ; équilibre adiabatique*. Pour exprimer l'équilibre thermodynamique, on doit évaluer les énergies émises et absorbées en moyenne par seconde (L. de Broglie, *Théorie quanta*, 1959, p. 84). L'équilibre thermique tend à se rétablir horizontalement grâce aux vents, et verticalement grâce aux ascendances (Jeux et sp., 1968, p. 1619).

c) BIOCHIMIE et PHYSIOL. Fait, pour plusieurs constituants d'un corps, d'être en proportion constante ; p. méton. état d'un corps dont les constituants restent en proportion constante. Équilibre organique ; maintien de l'équilibre. Équilibre du carbone et de l'azote dans les animaux (C. Bernard, *Notes*, 1860, p. 54). Ces substances qui deviennent de violents poisons sitôt que leur équilibre chimique est rompu (Bernanos, *Imposture*, 1927, p. 370). V. antigène ex. 1.

— Vx. Équilibre des humeurs. Exacte distribution des humeurs dans l'organisme, facteur de santé. Ces effets [de l'eau carminative] annoncent toujours en l'homme un équilibre parfait entre les humeurs (Balzac, C. Birotteau, 1837, p. 48).

d) BIOL. et ÉCOLOGIE. Situation dans laquelle les interactions entre la flore et la faune, le sol et la végétation d'un milieu donné sont telles que la structure et le fonctionnement de ce milieu restent constants. Équilibre biologique :

- 7. Du reste, la nature est si loin de partager nos préjugés, nos dégoûts, nos peurs enfantines, qu'elle semble soigner et protéger spécialement les espèces rongeurs qui contrarient l'économie de nos petites cultures, mais qui ailleurs l'aident utilement à maintenir l'équilibre des espèces et à combattre l'encombrement végétal de certains climats. Michelet, *Insecte*, 1857, p. 9.

2. SC. HUM.

a) Domaine de l'activité écon. et pol.

— ÉCONOMIE

- ÉCON. FIN. Équilibre d'un budget ; équilibre budgétaire, financier. Situation dans laquelle les dépenses d'un budget annuel sont entièrement couvertes par les recettes. Proclamer tous les ans l'équilibre d'un budget, qui n'a jamais été équilibré depuis qu'il existe (Goncourt, *Journal*, 1864, p. 5). Assurer l'équilibre de son budget sans faire appel à des subventions étrangères (Civilis. écr., 1939, p. 3806).

- ÉCON. POL. Situation dans laquelle le déficit ou l'excédent du commerce international

sont équivalents. Équilibre des échanges internationaux. Le rétablissement de notre équilibre économique et monétaire (De Gaulle, Mém., 1954, p. 21). L'équilibre de la balance touristique des pays européens (Jocard, Tour. et action État, 1966, p. 268).

— POLITIQUE

- POL. INTÉRIEURE. Équilibre des pouvoirs. Situation dans laquelle les pouvoirs politiques d'un pays se pondèrent et se contiennent mutuellement, de façon à exclure la prédominance de l'un d'eux. Décret absurde qui transformait l'équilibre des pouvoirs en hostilités réciproques (Staël, Consid. Révol. fr., 1817, p. 275).

- POL. INTERNAT. Situation dans laquelle des États limitent et contiennent leurs influences ou leurs pouvoirs de façon qu'aucun d'eux n'ait une prépondérance particulière ou qu'ils soient solidaires en cas de nécessité. Il existait alors en Europe un équilibre de forces ; mais la paix d'aujourd'hui ne fait songer qu'à une sorte d'équilibre de faiblesses, nécessairement plus instable (Valéry, Regards sur monde act., 1931, p. 30). On a dû rarement observer dans l'histoire du monde un changement aussi brusque dans l'équilibre des forces (Goldschmidt, Avent. atom., 1962, p. 58) :

8. Le propre de l'équilibre européen, c'est d'établir entre les divers états une solidarité telle, que, le plus grand se trouvant menacé dans le péril des moindres, tous les forts sont engagés, non par vertu, mais par égoïsme (ce qui est plus sûr), à la défense de tous les faibles. A. de Broglie, Diplom. et dr. nouv., 1868, p. 53.

Équilibre de la terreur. « Principe de stabilité fondé sur l'espoir que la terreur qu'inspirent les armes nucléaires dissuadera les adversaires d'en faire usage » (Gilb. 1971).

b) Domaine de la géogr. hum.

— DÉMOGR. Situation dans laquelle la population d'un pays est en harmonie avec les ressources du pays considéré. Équilibre de population, écueil de nos économistes (Fourier, Nouv. monde industr., 1830, p. 32).

— GÉOGR. et AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE. Métropole* d'équilibre.

— SOCIOL. Équilibre social. « État d'intégration dans lequel les tendances compétitives ou antagonistes se compensent réciproquement » (Willems 1970). Il est impossible que les peuples les plus forts ne tendent pas à s'incorporer les plus faibles (...); c'est une loi mécanique de l'équilibre social non moins nécessaire que celle qui régit l'équilibre des liquides (Durkheim, Divis. trav., 1893, p. 332).

Rem. Équilibre est utilisé le plus souvent au sing. ; on le rencontre parfois au plur. au sens usuel pour marquer un effet de style (cf. supra A 1, citat. de Valéry) et dans les

domaines sc. ou économique.

Étymologie et Histoire

1. 1544 « équivalence, égalité » *equalibre* (Maurice Scève, *Delie*, 419 ds Hug.) ;
 - a) 1611 « égalité de poids » *equilibre* (Cotgr.) ;
 - b) spéc. 1663 (Pascal, *Traité de l'équilibre des liqueurs*) ;
2. 1748 domaine pol. (Montesquieu, *Esprit des Lois*, XIII, 17, note ds DG). Empr. au lat. impérial *aequilibrium* « exactitude des balances, équilibre » composé de *aequus* « égal » et *libra* « balance ».

Fréq. abs. littér. : 2 926. **Fréq. rel. littér.** : XIX^e s. : a) 2 441, b) 2 357 ; XX^e s. : a) 3 548, b) 6 964. **Bbg.** Baudez (J.). *Le Cirque et son lang.* Vie Lang. 1962, p. 509. — Jourjon (A.). *Rem. lexicogr. R. Philol. fr. et Litt.* 1915-1916, t. 29, p. 63.

A.1.1 Définitions historiques

Dans les Classiques Garnier des 16^e et 17^e siècles on trouve les définitions suivantes :

- Furetière, 1690
EQUILIBRE. s.f.

Egale pesanteur de deux corps comparez l'un à l'autre. Pascal a fait un beau *Traité de l'Equilibre des liqueurs*. Quand un corps est posé hors de son centre de gravité, il n'est plus dans l'équilibre. Les Peintres doivent avoir grand soin d'observer cet équilibre, afin que leurs figures ne semblent point tomber et porter à faux. L'équilibre de la balance. La terre est au centre comme en équilibre. L'eau et les corps liquides se mettent toûjours en équilibre, quand ils ne sont point retenus d'ailleurs. EQUILIBRE, se dit aussi figurément en Morale. Mettre des gens dans l'équilibre, c'est les comparer les uns aux autres par leurs bonnes ou mauvaises qualitez. La paix est plus assurée, quand les puissances voisines sont dans l'équilibre. La santé du corps dure tant que les humeurs sont dans l'équilibre.

- 1694 [1ère éd.]

EQUILIBRE. s.m.

Estat des choses qui estant pesées sont si égales qu'elles n'emportent les balances ni d'un ni d'autre costé. Cela est en équilibre, dans un juste équilibre. mettre dans l'équilibre.

- On dit fig. Mettre en équilibre, tenir dans l'équilibre, pour dire, Mettre dans l'égalité, tenir dans l'égalité.
- On dit aussi fig. Faire l'équilibre, pour dire, Rendre les choses égales.

A.1.2 Définition espagnole

Tiré du dictionnaire de la *Real Academia Española*, 22^e édition.

Equilibrio (Del lat. *aequilibrium*) :

1. m. Estado de un cuerpo cuando fuerzas encontradas que obran en él se compensan destruyéndose mutuamente.
2. m. Situación de un cuerpo que, a pesar de tener poca base de sustentación, se mantiene sin caerse.
3. m. Peso que es igual a otro y lo contrarresta.
4. m. Contrapeso, contrarresto, armonía entre cosas diversas.
5. m. Ecuanimidad, medida, sensatez en los actos y juicios.
6. m. pl. Actos de contemporización, prudencia o astucia, encaminados a sostener una situación, actitud, opinión, etc., insegura o dificultosa.

A.2 Lexicographie du mot *stabilité*

En ce qui concerne la lexicographie du substantif féminin *stabilité*, on trouve sur le site du CNRTL :

Caractère, qualité de ce qui est stable ou en équilibre stable. Anton. instabilité.

A. —

1. **Caractère de ce qui reste en place, sans bouger ni tomber.** Pied de grandes dimensions assurant une parfaite stabilité (Catal. instrum. lab. (Prolabo), 1932, p. 128). Avant de s'asseoir (...) M. Élie vérifia la stabilité de sa chaise (Montherl., Célibataires, 1934, p. 740).

— [Avec une idée de solidité notamment dans le domaine de l'archit., de la constr., des trav. publ.] « État d'une construction qui demeure en bon état d'équilibre, sans rupture ni tassement des matériaux qui la composent » (Vogüé-Neufville 1971). Stabilité d'un édifice, d'un mur, d'une chaussée; lois de stabilité et de cohésion des matériaux; augmenter par des contreforts la stabilité d'une paroi. Mais il y a [en architecture] deux genres de solidité, la pesanteur et la cohésion. La solidité par la pesanteur s'appelle stabilité (Ch. Blanc, Gramm. arts dessin, 1876, p. 113) :

1. Il s'agit là d'utiliser pour la confection de la chaussée — ou tout au moins de sa fondation — le sol naturel lui-même, s'il s'y prête, en améliorant ses propriétés par l'addition des éléments qui lui manquent pour lui conférer une stabilité et une résistance suffisantes : addition de sable à un terrain argileux ou d'argile à un terrain sableux, incorporation de ciment ou de bitume, etc. J. Thomas, Route, 1951, p. 317.

2. Spécialement

a) MÉCAN. « Tendance d'un système à demeurer dans un état d'équilibre ou de régime permanent » (Mathieu-Kastler Phys. 1983). Stabilité de l'équilibre; stabilité dynamique; stabilité négative, positive. Les conditions de stabilité s'expriment par des propositions importantes (Mathieu-Kastler Phys. 1983).

b) MOYENS DE TRANSP. [À propos d'un navire] Faculté de conserver un cap constant sans qu'il soit nécessaire à l'homme de barre de manœuvrer fréquemment le gouvernail. [Le cuirassé] représentait le type de bâtiment de combat individuellement le plus puissant en raison (...) de sa vitesse (...), de sa flottabilité et de sa stabilité, qui étaient aussi grandes que possible (Le Masson, Mar., 1951, p. 15). [À propos d'un aéronef] Capacité d'un aéronef à retrouver une assiette de vol normale après une modification inopinée (d'apr. Thies Aéromodélisme 1984). Le pilote fait des embardées et ne gouverne pas régulièrement au cap donné, surtout si la stabilité de route de l'aéronef est mauvaise (A.-B. Duval, Hébrard, Nav. aér., 1928, p. 49). [À propos d'une automob.] Bonne tenue de route. Par qualité des pneus il faut d'ailleurs entendre aussi bien la résistance à l'usure et aux fatigues de toutes sortes que leur impose la route, l'adhérence au sol, les caractéristiques qui donnent aux véhicules leur stabilité, que le silence et le confort (Tinard, Automob., 1951, p. 344). [À propos de véhicules ferroviaires] „Ensemble des phénomènes

accompagnant la circulation des véhicules ferroviaires et ne présentant pas de caractère oscillatoire entretenu“ (Lar. encyclop. Suppl. 1975).

B. — [Avec une idée d'absence de variation]

1. [Dans le temps]

a) Capacité à conserver ses caractéristiques initiales, à ne pas subir de transformations plus ou moins spontanées. La conception évolutionniste de Lamarck (...) suppose que celles-ci [les espèces] passent de l'une à l'autre et qu'elles n'ont pas été l'objet de créations individuelles. L'espèce possède une stabilité provisoire en rapport avec la stabilité du milieu (Hist. gén. sc., t. 3, vol. 1, 1961, p. 542). b) Spécialement

— AGRIC., GÉOL. Stabilité (d'un sol). Capacité de résister à l'action des agents de dégradation. La couverture herbacée accroît la stabilité structurale du sol et freine efficacement l'érosion (Boulay, Arboric. et prod. fruit., 1961, p. 93). — CHIM. Propriété d'un corps, d'un composé, qui est dans son domaine d'équilibre et ne peut être le siège d'aucune réaction spontanée (d'apr. Duval 1959). Au point de vue chimique, la stabilité de l'arsenic dans le stovarsol [produit pharmaceutique] est grande. On peut chauffer impunément à l'ébullition des solutions neutres légèrement acides ou légèrement alcalines (Ce que la Fr. a apporté à la méd., 1946 [1943], p. 74). Si nous envisageons la série des ions et la stabilité des assemblages qu'ils forment, celle-ci décroît à mesure que le diamètre de l'ion croît et que la valence décroît. Le tétraèdre constitué par l'aluminium et plus encore par le fer ferrique est beaucoup moins stable que celui constitué par le silicium (Caillère, Hénin, Minér. argiles, 1963, p. 32).

Stabilité d'une suspension. Capacité d'une suspension à rester semblable à elle-même sans décantation, sinon lente, des particules. La méthode [des mesures de densités], si elle est d'un emploi commode, fait l'objet d'une critique assez sérieuse : elle est très sensible à la stabilité de la suspension (Caillère, Hénin, Minér. argiles, 1963, p. 81).

— INDUST. AGRO-ALIM. Propriété d'une denrée à résister à l'action de facteurs extérieurs qui pourraient la faire évoluer. La stabilité est un des composants essentiels de la qualité des denrées (Clém.Alim.1978).

— PÉTROCHIM. Qualité d'un produit pétrolier qui ne s'altère pas en cours de stockage ou d'utilisation. Éprouvette graduée bouchée émeri (...) pour le contrôle de la stabilité au stockage des émulsions bitumineuses pour routes (Catal. instrum. lab. (Prolabo), 1932, p. 238). La stabilité des essences exige des inhibiteurs contre la formation de gommages ; celle des lampants et des huiles de graissage concerne avant tout la couleur, qui ne doit pas devenir plus foncée avec le temps (Lar. encyclop.).

— PYROTECHNIE. Résistance d'une substance explosive à s'altérer spontanément. La stabilité ne peut être précisée que dans des conditions définies (Pyrotechnie1972). Les épreuves de stabilité (...) « épreuve de résistance à 110 C », ont pour objet d'évaluer le degré de stabilité de ces substances, soit à la fin de leur fabrication, soit au cours de leur conservation (GDEL).

— PHYS. NUCL. Capacité à ne pas se désintégrer spontanément ; fait de ne pas présenter de radioactivité mesurable. Les premières connaissances sur la stabilité des atomes ont été obtenues alors que la notion de noyau n'existait pas encore (...) la stabilité nucléaire exige un certain rapport entre la charge et la masse du noyau (Joliot, Curie, Radioact. artif., 1935, p. 3).

2. [Dans l'espace ; avec une idée d'immobilité, de sédentarité]

a) [À propos d'une pers.] Fait de ne pas être mobile, de ne pas changer constamment ou fréquemment de lieu de résidence. Le chef d'entreprise (...) devrait bien méditer sur les avantages multiples que peut lui conférer la création d'équipes sportives dans son personnel : rendement accru de la production, esprit de communauté, stabilité de la main-d'œuvre (Becquet, Organ. loisirs travail., 1939, p. 69).

— En partic. Fait de garder un même emploi. Stabilité professionnelle. Politique des anciennes compagnies de chemin de fer payant à leur personnel des salaires relativement faibles mais leur assurant en contre partie une parfaite stabilité d'emploi et d'importants avantages complémentaires (Meynaud, Groupes pression en Fr., 1958, p. 262). Quand on discute de l'amélioration de la situation des chercheurs dans le sens d'une amélioration de la stabilité, on se heurte toujours à cette crainte que la fécondité du chercheur ne s'épuise rapidement avec l'âge (Encyclop. éduc., 1960, p 267).

b) [À propos d'un inanimé] Caractère de ce qui ne bouge pas, qui se maintient dans la durée. Le magicien est censé pouvoir procurer à ses clients la richesse, la santé. Les rites religieux peuvent aussi avoir cet effet, selon la croyance des fidèles, ou bien ils contribuent à la stabilité du monde, à la prolifération des espèces animales, ils assurent de bonnes récoltes (Jeux et sports, 1967, p. 802).

— MUS., HARM. „Propriété qu'à une note ou un accord de créer une impression statique de repos" (Mus. 1976). [Les] compositeurs modernes (...) se trompent parfois, faute de bien connaître les conditions de stabilité de l'édifice harmonique qu'ils construisent (Durrute, Esthét. mus., 1876, p. 353).

C. — Au fig.

1. [À propos d'une pers.] **Constance dans la conduite, les idées, les choix.** Conférer, don-

ner de la stabilité (à qqn). Maze a raison ; ces femmes qui n'ont pas de sens manquent de stabilité, même dans l'intelligence. Elles sont capricieuses et décevantes (Chardonne, Épithal., 1921, p. 446).

— P. méton.

- [À propos d'un affect, d'un comportement] Synon. de permanence. Les rythmes psychiques : entre le changement pur qui ne ramènerait jamais un être au même état, et l'identité pure qui le maintiendrait absolument égal à lui-même, le rythme assure un certain retour, et par suite, une certaine stabilité dans le changement (Mounier, Traité caract., 1946, p. 281) :

2. En pensant l'univers et en nous pensant nous-mêmes, nous engendrons un ordre de l'être intermédiaire entre l'instantanéité de l'être des corps et la permanence éternelle de Dieu. Pourtant, l'homme passe lui-même sous cette frêle stabilité de sa mémoire, qui va sombrer à son tour dans le néant si Dieu ne la recueille et ne la stabilise. Gilson, Espr. philos. médiév., 1932, p. 184.

- [À propos des faits soc., des instit. soc.] La forme du mariage n'est pas tout ; il faut encore se préoccuper de sa stabilité. Il y a à cet égard de grandes différences, entre les diverses sociétés humaines (Tiers Monde, 1956, p. 164). Le plus fréquemment, la religion se présente au sociologue comme une puissance de stabilité, de bon ordre moral et social, comme une norme doublant d'une référence divine les règles terrestres du bien-vivre (Univers écon. et soc., 1960, p. 64-9).

2. [À propos d'un inanimé]

a) **Caractère de ce qui ne varie pas, de ce qui demeure au même niveau, à la même valeur.** Le mot « dépôt » implique plus de stabilité que l'expression « compte courant », qui évoque l'idée d'un flux et d'un reflux, et admet la possibilité de soldes actifs ou passifs (Baudhuin, Crédit et banque, 1945, p. 165).

b) Spécialement

) ÉCON. [Avec une idée d'équilibre] Stabilité d'un marché, des cours (du pétrole, de la Bourse). Cet examen de la problématique des croissances liées aide à préciser liminairement la place qui revient à la théorie néo-classique dans l'interprétation des rapports entre stabilité financière et équilibre de la balance des paiements (Perroux, Écon. XXes., 1964, p. 521).

- Stabilité du pouvoir d'achat. Maintien de la quantité de biens ou services que peut procurer une unité monétaire à un moment donné. Dans des périodes de hausse de prix inflationniste, la fonction sociale de l'impôt — celle du « nivellement » des revenus et

fortunes — doit être reléguée au second plan pour des raisons relatives à la considération des buts économiques et monétaires (stabilité du pouvoir d'achat de la monnaie, équilibre des balances extérieures) (Univers écon. et soc., 1960, p. 48-1).

- Stabilité de la monnaie, stabilité monétaire (par rapport à une autre, à d'autres monnaies). Fait pour une monnaie de ne pas subir de tensions à la hausse ou à la baisse, de ne pas subir de dévaluation ou de réévaluation. Stabilité du dollar, du franc. Alors que les classiques limitaient le rôle de l'État à la protection de la stabilité de la monnaie et à la gestion équilibrée des finances publiques, Keynes accorde à l'État un rôle décisif dans toute l'activité économique (Lesourd, Gérard, Hist. écon., 1968, p. 172).

- Stabilité des prix. Fait pour les prix de ne pas subir de trop fortes augmentations. Les progrès sont supposés acquis seulement moyennant l'instabilité; la stabilité des quantités et celle des prix, la stabilité des prix et celle des changes sont considérées comme incompatibles entre elles (Perroux, Écon. XXes., 1964, p. 570).

- Contrats de stabilité. « Accords passés entre les professions et les pouvoirs publics pour maintenir la stabilité des prix » (GDEL).

) POL. [À propos d'un régime, d'une constitution] Caractère d'équilibre provenant de la pondération des pouvoirs, de ce qu'ils se contiennent mutuellement sans faire courir le risque de crise. La stabilité constitutionnelle, la puissance et la prospérité américaine ont valu à la Constitution américaine de nombreux admirateurs (Vedel, Dr. constit., 1949, p. 167).

- Stabilité gouvernementale. « Caractéristique d'un régime parlementaire dans lequel les changements gouvernementaux sont peu fréquents » (GDEL).

Stabilité ministérielle. « Continuité dans les titulaires de certains postes ministériels, même en cas d'instabilité gouvernementale » (GDEL). Quant aux effets de l'existence du cabinet sur la hiérarchie classique et sur les relations entre l'administration centrale et le ministre, ils sont, à l'évidence, différents en période d'instabilité ou de stabilité ministérielle (Belorgey, Gouvern. et admin. Fr., 1967, p. 91).

— [Dans le cont. des relations internat.] L'arme nucléaire introduit un facteur de stabilité absolument nouveau. Là où son action se fait sentir, les situations se figent, alors que, là où elle est absente, le bouleversement s'accélère (Beaufre, Dissuasion et strat., 1964, p. 203).

c) P. anal., MÉTÉOR. Stabilité (hydrostatique). « État d'équilibre hydrostatique de l'atmosphère dans lequel une particule d'air écartée légèrement de son niveau initial est soumise à une force hydrostatique tendant à l'y ramener » (Villen. 1974). Stabilité de

l'atmosphère ; zone de stabilité ; stabilité absolue. Les régions d'entropie croissante sont des régions de stabilité (Delc.1926). Quand il y a dans l'atmosphère une inversion de température, cette inversion (...) donne une grande stabilité à la couche correspondante (Maurain, Météor., 1950, p. 120).

Étymologie et Histoire

1. a) 1119 *stabilitet* « qualité de ce qui a une assiette ferme » (Philippe de Thaon, Comput, 983 ds T.-L.) ;
 b) 1832 « propriété d'un corps de revenir à son équilibre après de petites oscillations » (Raymond) ;
 c) 1862 aéron. (Presse sc. des Deux Mondes, II, 118 ds R. Ling. rom. t. 47, p. 202) ;
2. a) fin XII^e s. « fermeté, constance (de l'esprit, des sentiments) » (Règle de S. Benoit, ms. Sens, p. 162 ds Gdf. Compl.) ;
 b) 1406 « qualité de ce qui est durable (en parlant de la foi) » (Ord. [4 oct.], IX, 148, *ibid.*) ;
3. 1818 chim. (Thenard, Instit. Méd. acad. sc., t. 3, p. 444 ds Littré). Empr. au lat. *stabilitas* « solidité, fermeté, constance », dér. de *stabilis* (stable*). A remplacé l'a. fr. *estabilité* (1^{re} moit. du VII^e s., *estabilited*, Psautier Oxford, 103, 6 ds T.-L. ; 1121-34, *estabilité*, Philippe de Thaon, Bestiaire, éd. E. Walberg, 1509 et 2786).

Fréq. abs. littér. : 360. **Fréq. rel. littér.** : XIX^e s. : a) 468, b) 333 ; XX^e s. : a) 339, b) 748. **Bbg.** Dub. Pol. 1962, p. 426. — Quem. DDL t. 11, 21, 28. — Vardar Soc. pol. 1973 [1970], p. 310.

A.2.1 Définition espagnole

Tirée du dictionnaire de la *Real Academia Española*, 22^e édition.

Estable (Del lat. *stabīlis*) :

1. adj. Que se mantiene sin peligro de cambiar, caer o desaparecer. *Temperatura, economía estable.*

2. adj. Que permanece en un lugar durante mucho tiempo. *Inquilino estable.*
3. adj. Que mantiene o recupera el equilibrio. *Un coche muy estable.*

Les questionnaires

B.1 Les questionnaires « Ingénierie Didactique »

Ingeniería didáctica IELE2300-03
Formulario 1: individual

Mire bien estos dos sistemas físicos en las situaciones 1,2 (balanza) y 3,4 (cuerpo humano):

1. ¿ Cuales de estos sistemas están en equilibrio?

Casos	1	2	3	4
¿Equilibrio? Sí/No				

2. Justifique su respuesta con el máximo de detalles:



Caso 1



Caso 2



Caso 3



Caso 4

Ingeniería didáctica IELE2300-03
Formulario 2: grupo

Miren bien estos dos sistemas físicos en las situaciones de equilibrio 1,2 (balanza) y 3,4 (cuerpo humano):

1. Encuentren una definición del equilibrio que permita predecir el equilibrio de todos estos casos con certeza sin hacer cálculos:

2. Propongan una experiencia para verificar que un sistema está en equilibrio, de acuerdo con la definición precedente.

$$T = t_0 + 5\text{min}$$



Caso 1



Caso 2



Caso 3



Caso 4

Ingeniería didáctica IELE2300-03
Formulario 3: individual

Mire bien este sistema físico (péndulo invertido sobre un carro que se mueve) en estas dos situaciones (B, D).

1. ¿El carro puede estar en equilibrio en estos dos casos?

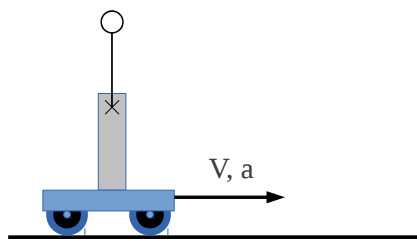
Caso	B	D
¿Equilibrio posible? Sí/No		

2. ¿El péndulo puede estar en equilibrio en estos dos casos?

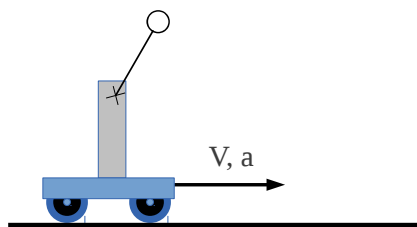
Caso	B	D
¿Equilibrio posible? Sí/No		

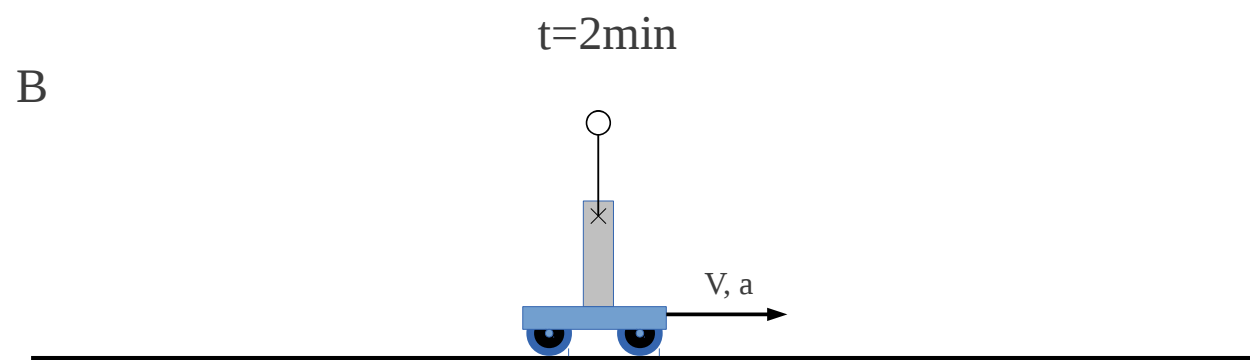
3. Justifique sus respuestas con el máximo de detalles:

B



D





Ingeniería didáctica IELE2300-03
Formulario 4: grupo

Miren bien este sistema físico (péndulo invertido sobre un carro que se mueve) que está en equilibrio en las dos situaciones (B, D): en $t_0=0$ y en $t_1=t_0+2\text{min}$.

1. ¿La definición precedente permite explicar estos casos de equilibrio?

¿Por que?

2. ¿Como modificar la definición precedente del equilibrio con el fin de que permita justificar el equilibrio de estos dos casos más los otros casos?



Caso 1



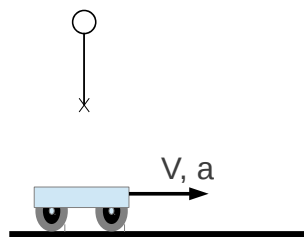
Caso 2



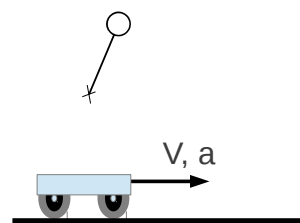
Caso 3



Caso 4



Caso 5



Caso 6

Ingeniería didáctica IELE2300-03
Formulario 1-2: individual

Mire bien estos tres sistemas físicos en las situaciones 1, 2 (balanza); 3, 4 (cuerpo humano) y 5, 6 (péndulo invertido sobre un carro):

1. ¿ Cuales de estos sistemas están estables?

Casos	1	2	3	4	5	6
¿estable? Sí/No						

2. Justifique su respuesta con el máximo de detalles:

Ingeniería didáctica IELE2300-03
Formulario 2-2: grupo

Miren bien estos tres sistemas físicos en las situaciones de equilibrio estable 1, 2 (balanza) y 3, 4 (cuerpo humano) y o inestable 5, 6 (péndulo invertido sobre un carro):

1. Encuentren una definición de la estabilidad que permita predecir la estabilidad o la inestabilidad de estos casos con certeza sin hacer cálculos:

2. Propongan una experiencia para verificar que un sistema está en equilibrio, de acuerdo con la definición precedente.

Ingeniería didáctica IELE2300-03
Formulario 3-2: individual

Mire bien este sistema físico (un libro en una mesa) en las dos posiciones propuestas (A y B):

1. ¿Este sistema está en equilibrio en las dos posiciones?

Caso	Posición A	Posición B
¿Equilibrio? Sí/No		

2. ¿Este sistema está en equilibrio estable en las dos posiciones propuestas?

Caso	Posición A	Posición B
¿Equilibrio estable? Sí/No		

3. ¿Este sistema está en equilibrio inestable en las dos posiciones propuestas?

Caso	Posición A	Posición B
¿Equilibrio inestable? Sí/No		

4. Justifique sus respuestas con el máximo de detalles:

Ingeniería didáctica IELE2300-03
Formulario 4-2: grupo

Miren bien todos los sistemas físicos (balanza, cuerpo humano, péndulo invertido sobre un carro y libro sobre una mesa) que están en equilibrio en todas las situaciones propuestas.

1. ¿Las definiciones precedentes permiten describir todos estos comportamientos como el del libro sobre una mesa?

¿Por que?

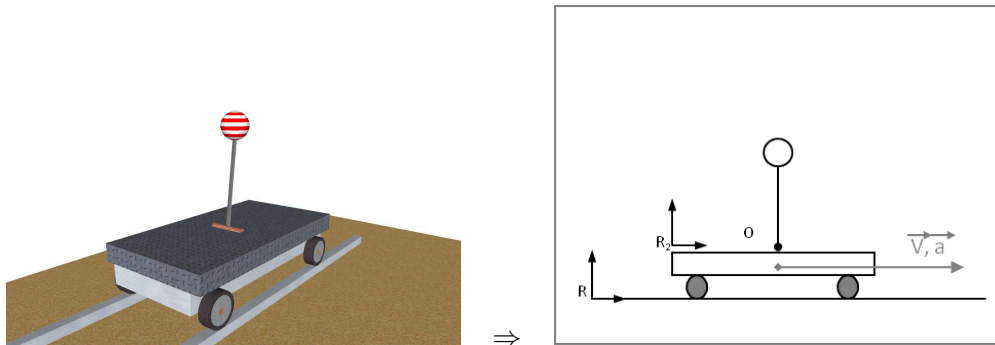
2. ¿Como modificar la definición precedente de un equilibrio estable y inestable con el fin de que permita describir el comportamiento de todos estos casos de equilibrio?

B.2 Les questionnaires « connaissances »

Questionnaire sur l'équilibre et la stabilité des systèmes mécaniques commandés

Question 1

On considère un système constitué d'un pendule pesant rigide inversé (voir figures ci-dessous) dont la tige est de masse négligeable et dont l'axe de rotation, O , est fixé sur un chariot que l'on peut déplacer sur des rails rectilignes et horizontaux avec une vitesse \vec{V} et une accélération \vec{a} par rapport au référentiel terrestre \mathcal{R} .



↔ Identifiez toutes les combinaisons de « V » et « a » qui permettent d'obtenir des situations où le pendule est, selon vous, dans un état d'équilibre dans \mathcal{R}_2 , en cochant les cases du tableau ci-dessous (**une situation par colonne**).

Schématisez ensuite approximativement la position du pendule correspondante et **entourez** la bonne réponse au sujet de la stabilité :

Attention : le nombre de colonnes présenté ne correspond pas forcément au nombre de cas possibles.

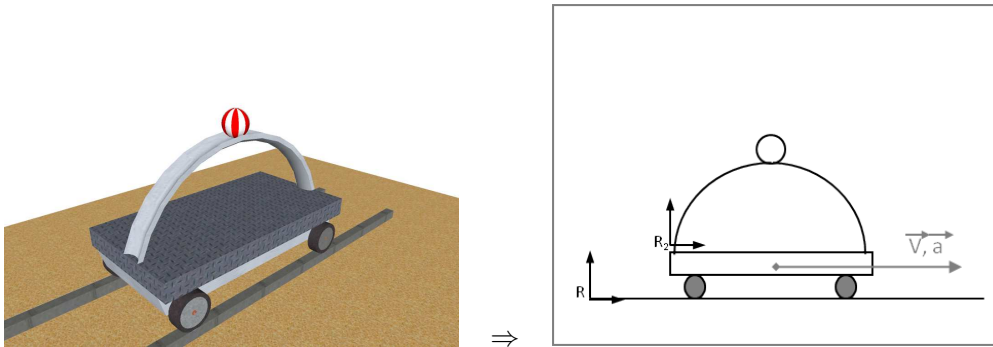
		Situations						
		1	2	3	4	5	6	7
a	$C^{te} = 0$	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	$C^{te} \neq 0$	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
V	$C^{te} = 0$	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	$C^{te} \neq 0$	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	variable	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Schéma de la position du pendule								
Système stable ?		oui/non	oui/non	oui/non	oui/non	oui/non	oui/non	oui/non

Justifiez brièvement (vous pouvez dessiner sur la figure si vous le souhaitez) ou précisez votre point de vue si nécessaire :

Questionnaire sur l'équilibre et la stabilité des systèmes mécaniques commandés

Question 1

On considère un système composé d'une bille pouvant se déplacer librement - en roulant sans glisser - sur une gouttière en arc de cercle (voir figure ci-dessous) fixé sur un chariot que l'on peut déplacer sur des rails rectilignes et horizontaux avec une vitesse \vec{V} et une accélération \vec{a} par rapport au référentiel terrestre \mathcal{R} .



↔ Identifiez toutes les combinaisons de « V » et « a » qui permettent d'obtenir des situations où la bille est, selon vous, dans un état d'équilibre dans \mathcal{R}_2 , en cochant les cases du tableau ci-dessous (**une situation par colonne**).

Schématisez ensuite approximativement la position de la bille correspondante et **entourez** la bonne réponse au sujet de la stabilité :

Attention : le nombre de colonnes présenté ne correspond pas forcément au nombre de cas possibles.

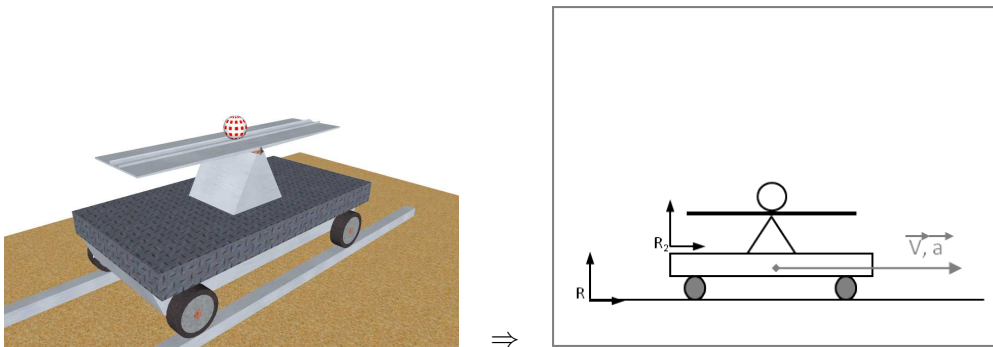
		Situations						
		1	2	3	4	5	6	7
a	$C^{te} = 0$	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	$C^{te} \neq 0$	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
V	$C^{te} = 0$	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	$C^{te} \neq 0$	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	variable	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Schéma de la position de la bille								
Système stable ?		oui/non	oui/non	oui/non	oui/non	oui/non	oui/non	oui/non

Justifiez brièvement (vous pouvez dessiner sur la figure si vous le souhaitez) ou précisez votre point de vue si nécessaire :

Questionnaire sur l'équilibre et la stabilité des systèmes mécaniques commandés

Question 1

On considère un système composé d'une bille qui peut se déplacer librement - en roulant sans glisser - sur une gouttière montée sur un plateau mobile autour d'un axe de rotation fixé sur un chariot (voir figures ci-dessous). On peut déplacer ce chariot sur des rails rectilignes et horizontaux avec une vitesse \vec{V} et une accélération \vec{a} par rapport au référentiel terrestre \mathcal{R} et le plateau peut être orienté comme on le souhaite (mais il est libre).



↔ Identifiez toutes les combinaisons de « V » et « a » qui permettent d'obtenir des situations où la bille est, selon vous, dans un état d'équilibre dans \mathcal{R}_2 en cochant les cases du tableau ci-dessous (**une situation par colonne**).

Schématisez ensuite approximativement la position du plateau correspondante et **entourez** la bonne réponse au sujet de la stabilité :

Attention : le nombre de colonnes présenté ne correspond pas forcément au nombre de cas possibles.

		Situations						
		1	2	3	4	5	6	7
a	$C^{te} = 0$	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	$C^{te} \neq 0$	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
V	$C^{te} = 0$	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	$C^{te} \neq 0$	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	variable	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Schéma de la position du plateau								
Système stable ?		oui/non	oui/non	oui/non	oui/non	oui/non	oui/non	oui/non

Justifiez brièvement (vous pouvez dessiner sur la figure si vous le souhaitez) ou précisez votre point de vue si nécessaire :

Équations du système pendule/chariot

Voici une approche fréquente dans l'enseignement supérieur (ou dans les classes préparatoires aux grandes écoles), qui permet d'obtenir un modèle mathématique du système.

En général, dans le cadre de la commande des systèmes, on étudie l'évolution du système après avoir adopté une approche Lagrangienne qui permet d'obtenir directement l'ensemble des *équations d'état*.

L'idée principale est ici d'obtenir un ensemble d'équations différentielles reliant toutes les grandeurs du système, en une seule fois.

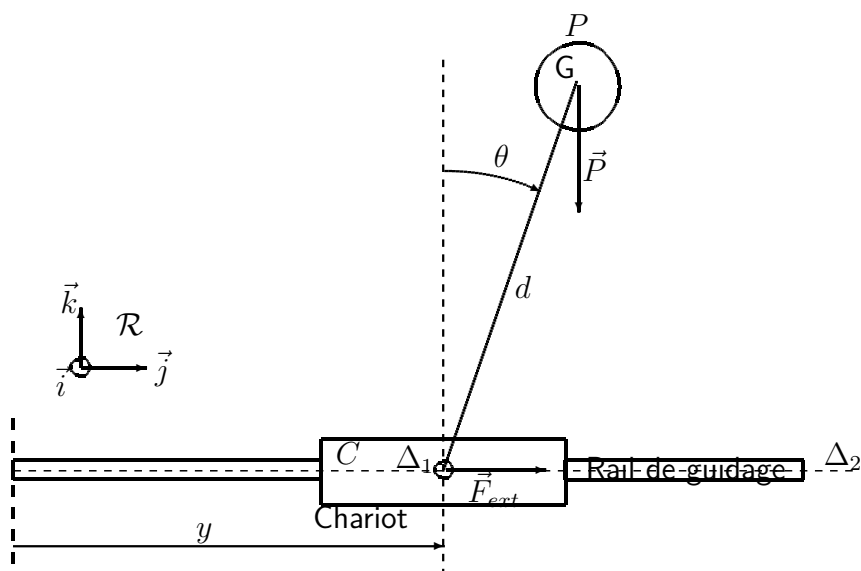


FIGURE C.1 – Le pendule inverse

Considérons un pendule P , de masse m_p , mobile dans le plan, et dont l'axe de rota-

tion est entraîné par un chariot C de masse m_c se déplaçant sans frottements sur un rail de guidage.

On suppose que la masse de la tige du pendule, de longueur d , est négligeable.

Considérons un référentiel galiléen \mathcal{R} de base $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$. \vec{k} est orienté vers le haut (verticale terrestre). Soit Δ_1 colinéaire à \vec{i} , l'axe de rotation du pendule, Δ_2 , colinéaire à \vec{j} , l'axe de déplacement du chariot (voir figure C.1).

Soit θ l'angle que fait le pendule avec la verticale (positif pour une rotation dans le sens direct).

Donc, si l'on se réfère au schéma où y est la position du chariot, θ est l'angle que fait le pendule avec la verticale et où les forces agissantes sont la gravité et une force externe de la direction de y , le Lagrangien est $L = T - V$, dans lequel T est l'énergie cinétique du système et V l'énergie potentielle. Alors,

$$T = T_{cart} + T_{pendulum}$$

où :

$$T_{cart} = \frac{1}{2} M_c \dot{y}^2$$

et :

$$T_{pendulum} = \frac{1}{2} M_p (\dot{y}^2 + 2 \dot{y} d \dot{\theta} \cos \theta + d^2 \dot{\theta}^2) + \frac{1}{2} \mathcal{J} \dot{\theta}^2$$

pour lequel $\mathcal{J} = m_p d^2$

Maintenant, l'énergie potentielle :

$$V = m_p g d \cos(\theta)$$

Seul le mouvement du pendule est concerné parce que la seule énergie potentielle dans le système vient de la gravité.

Alors, l'expression du Lagrangien devient :

$$L = T - V = \frac{1}{2} (M_p + M_c) \dot{y}^2 + M_p \dot{y} d \dot{\theta} \cos \theta + \frac{1}{2} M_p d^2 \dot{\theta}^2 - m_p g d \cos(\theta)$$

L'équation de Lagrange du système est :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = F_{ext}$$

Soit :

$$\frac{\partial}{\partial q} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) \dot{q} + \frac{\partial}{\partial \dot{q}} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) \ddot{q} - \frac{\partial L}{\partial q} = F_{ext} \quad (C.1)$$

Où F_{ext} est la force appliquée au chariot, une force non conservative (ici, c'est l'entrée du système du point de vue de l'automatique) et q sont les coordonnées généralisées, où :

$$q = \begin{pmatrix} y \\ \theta \end{pmatrix}$$

Donc nous avons clairement $\partial L / \partial y = 0$, et :

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{y}} = (m_p + m_c) \dot{y} + m_p d \dot{\theta} \cos(\theta)$$

d'où :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{y}} \right) = (m_p + m_c) \ddot{y} + M_p d \cos(\theta) \ddot{\theta} - \sin(\theta) \dot{\theta}^2$$

L'équation du mouvement pour ces variables est donc :

$$(m_p + m_c) \ddot{y} + m_p d (\ddot{\theta} \cos(\theta) - \dot{\theta}^2 \sin(\theta)) = F_{ext} \quad (C.2)$$

Ensuite, pour θ , nous avons :

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = -m d \dot{y} \dot{\theta} \sin(\theta) + m_p g d \sin(\theta)$$

donc,

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = m_p d \dot{y} \cos(\theta) + m_p d^2 \dot{\theta}$$

Si on dérive :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) = m_p d (\ddot{y} \cos(\theta) - \dot{y} \dot{\theta} \sin(\theta) + d \ddot{\theta})$$

L'équation du lagrangien pour ces variables est alors :

$$m_p d (\ddot{y} \cos(\theta) + d \ddot{\theta} - g \sin(\theta)) = 0 \quad (C.3)$$

Si on rassemble C.2 et C.3 on obtient :

$$(m_p + m_c) \ddot{y} + m_p d (\ddot{\theta} \cos(\theta) - \dot{\theta}^2 \sin(\theta)) = F_{ext} \quad (C.4)$$

$$m_p d (\ddot{y} \cos(\theta) + d \ddot{\theta} - g \sin(\theta)) = 0 \quad (C.5)$$

Qui sont les équations du mouvement. En général, on linéarise ces équations autour de la position verticale afin de rendre le développement d'un régulateur plus aisée.

Un outil d'évaluation informatique du raisonnement « évolutionniste »

D.1 Introduction

Afin de mettre à l'épreuve les deux approches citées dans la première partie, dans l'étude de la stabilité et de l'équilibre des systèmes (mécaniques) par les étudiants, nous avons étudié un test dont l'objectif général est de permettre de confronter sur un même système, l'approche *disciplinaire* purement statique (mettant en jeu l'application d'un bilan de forces et de moments, par exemple) et l'approche *évolutionniste*, c'est-à-dire à l'observation de l'évolution du même système au cours du temps.

À cet objectif général, sont associées quelques contraintes didactiques, on souhaite en effet :

- Un système suffisamment simple pour ne pas poser trop de problème aux étudiants quant à la compréhension de son fonctionnement (par exemple, pas de mouvement d'entraînement comme dans les exemples de systèmes de la première partie)
- Un système représentatif de certaines conceptions erronées classiques (ceci, pour provoquer un conflit cognitif de façon aisée en examinant certains couples prédictions/évolutions réelles)
- Un système pouvant présenter différents états d'équilibre (stables, instables et indifférents).

De plus, au niveau opérationnel, nous avons fait le choix d'une administration aisée à distance.

Pour toutes ces raisons notre choix s'est porté sur un test informatique accessible via internet et un dispositif réel¹ de type balance « prototypique »². Pour atteindre l'objectif fixé en terme de d'accessibilité au comportement du système, sans multiplier les variables du système à analyser, nous avons choisi un dispositif à bras égaux³ mais avec un axe de rotation réglable (en position). La variation du type d'équilibre du système (stable, instable et indifférent) est ainsi rendu possible en jouant sur l'unique variable « position de l'axe de rotation sur la largeur du fléau ».

Le choix d'un dispositif réel, présenté au travers de différentes photographies, nous permet, le cas échéant, de montrer et d'utiliser le même dispositif en classe en cas d'utilisation du test à des fins de formation (ce qui rend les confrontations prédictions/réalisations plus simples à interpréter qu'en cas d'utilisation de systèmes dissemblables).

D.2 Structure globale du test

Les questionnaires se composent de trois parties :

- Un recueil d'informations sur l'étudiant (nom, prénom, université) et sur ses représentations de l'équilibre. La présentation du dispositif physique – le système – sur lequel on va demander de se prononcer dans la suite quant à l'état d'équilibre et de stabilité
- Une partie liée à l'approche *disciplinaire* : on demande de prévoir le comportement du système et de le caractériser
- Une partie concernant l'approche *évolutionniste* : connaissant l'évolution du système, on demande de le caractériser

D.2.1 Les dispositifs proposés

Pour étudier l'influence de l'apparence du dispositif sur la compréhension et la réussite au test informatique, nous avons créé deux variantes du même questionnaire. L'idée principale étant de proposer deux systèmes légèrement différents mais régis par les mêmes

1. C'est-à-dire un « vrai » système, réel, pas seulement un schéma.

2. C'est-à-dire épurée, sans plateaux mais qui fait immédiatement référence à la balance.

3. La variation de la longueur des bras de fléau aurait pu être un choix judicieux en cas de travail sur les moments mais ce n'est pas ici notre objectif.

équations et donc le même comportement.

Le premier type de balance est composé d'un fléau monobloc fixé sur un axe de rotation dont on peut modifier la position sur la largeur du fléau (voir photos D.1, (a)). La barre est composée d'un matériaux homogène et les deux portions de fléau de chaque côté de l'axe de rotation sont de même longueur. On va l'appeler dans la suite, le système de type 1 ou *balance droite*.

L'autre système est composé d'un fléau en deux parties fixé sur un axe de rotation, dont on peut modifier la forme générale, c'est-à-dire l'alignement des deux portions, l'une par rapport à l'autre (voir photos D.1, (b)). Les deux portions sont de masses et de longueurs égales et composées d'un matériaux parfaitement homogène (plastique). Ce sera le système de type 2 ou *balance coudée*. L'idée de ce dispositif, vient du livre de Renn et Damerow (2012b, 2012c, 2012a). Un tel système fut en effet utilisé au XVI^e siècle comme support de réflexion à propos de l'équilibre par les protagonistes de « The equilibrium Controversy » ; Giovanni Battista Benedetti⁴ et Guidobaldo del Monte⁵. Ce dispositif possède une propriété très intéressante : il permet de « voir », en quelque sorte, de manière directe les distances entre les droites supports des poids de part et d'autre de l'axe de rotation et celui-ci, ce qui permet une évaluation plus aisée des moments de ces poids⁶.

Chacun des deux dispositifs peut recevoir des masses constituées de rondelles en métal en des emplacements spécialement prévus à cet effet et permettant de lester éventuellement différemment chaque côté du dispositif afin d'obtenir un équilibre avec une position incliné du fléau.

Le questionnaire débute par une description similaire à la précédente accompagnée de l'une ou l'autre des deux photos D.1.

Du point de vue physique, mécanique, les deux systèmes sont similaires et se comportent donc de la même façon lorsque l'on déplace l'axe de rotation du premier vers le haut (respectivement vers le bas) du fléau, ou que l'on impose un angle entre les deux portions du deuxième fléau conduisant à une forme en \wedge (ou respectivement en \vee).

On est donc en présence d'un système mécanique présentant soit deux positions d'équilibre *classiques*⁷, soit une infinité. Dans le premier cas, on observe une position d'équilibre

4. 1530-1590.

5. 1545-1607

6. Le moment du poids étant justement le produit de cette distance par le module du poids.

7. Aux yeux des élèves.

stable lorsque l'axe de rotation est situé exactement au dessus⁸ du centre de masse du système et une position d'équilibre instable lorsque l'axe de rotation est situé exactement au dessous du centre de masse du système. Dans le deuxième cas, il existe aussi des positions d'équilibre dites *indifférentes* lorsque l'axe de rotation et le centre de masse du système correspondent exactement et dans ce cas, n'importe laquelle des positions du système est une position d'équilibre. Tout ceci sera expliqué plus en détail à la section D.2.2.

Les deux variantes des questionnaires seront traitées comme une seule dans la suite et il sera seulement fait mention des différences lorsqu'elles se présenteront.

Présentation des dispositifs

Chaque système est présenté par une photo et un texte.

On y présente le dispositif de façon précise et en particulier on attire l'attention du sondé sur le fait que la position de l'axe de rotation est susceptible de changer. En effet, il n'ai pas aisé de se rendre compte de ce changement sans indication, ou, à tout le moins, seuls les sondés qui ont un sens de l'observation aigu seraient en capacité de se rendre compte de ce changement, sans indication. Ceci occasionnerait des réponses incorrectes, non par méconnaissance des conditions d'équilibre et de stabilité mais pour des difficultés de compréhension ou simplement d'observation du dispositif (la coloration jaune fluorescente de l'axe de rotation est aussi là pour éviter cette difficulté). Même si c'est un élément fondamental pour appliquer correctement le critère de nullité de la somme des efforts extérieurs (et plus particulièrement celle des moments des forces extérieures) cette précision qui provient d'entretiens d'explicitation, peut éviter un biais dans l'interprétation des résultats.

D.2.2 Partie disciplinaire

Description du test

L'idée principale dans la première partie du test est que les étudiants puissent prédire l'évolution du système à partir de l'application de critères ne nécessitant pas de connaître son évolution, critères que tout étudiant de première année d'étude supérieure a vu auparavant (cf. partie précédente) et est donc susceptible d'appliquer dans une situation

8. C'est-à-dire à la verticale de celui-ci.

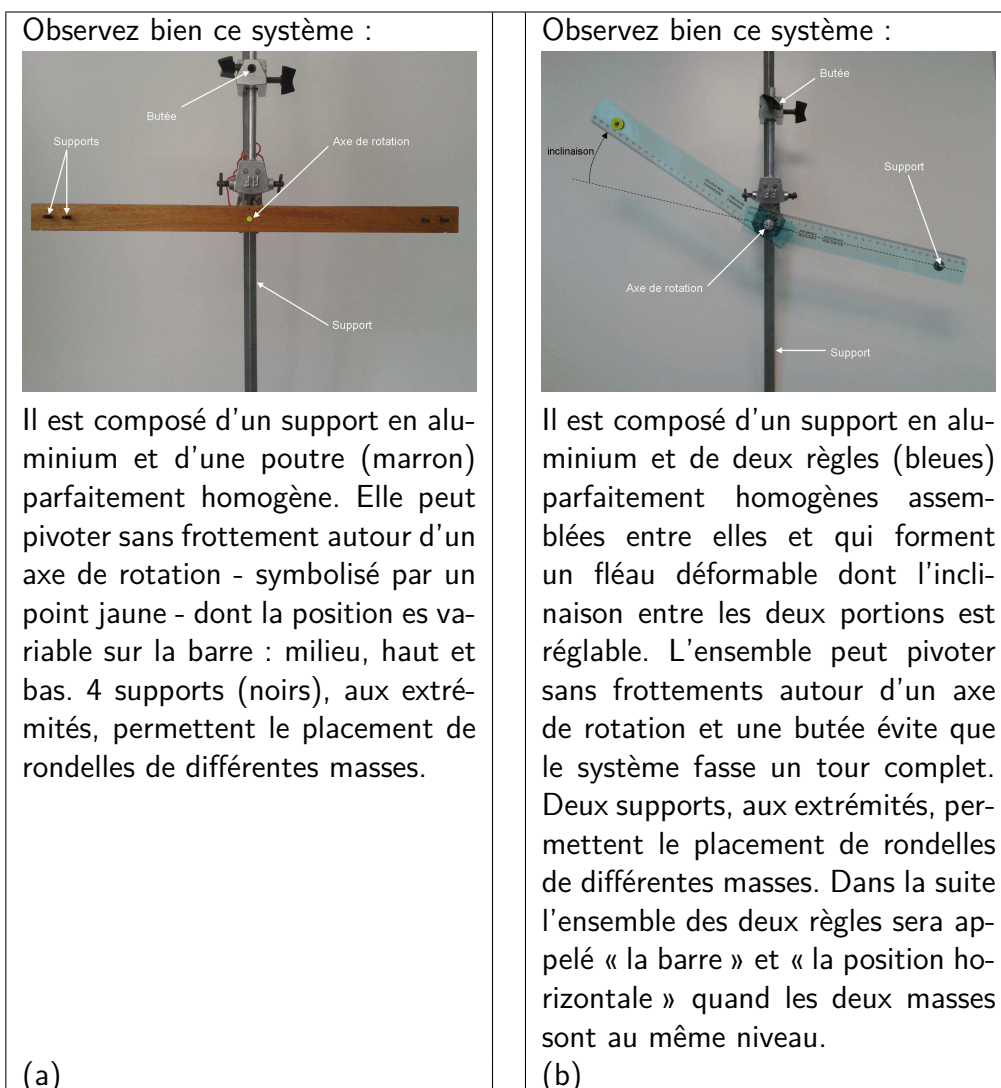


FIGURE D.1 – Les systèmes proposés

simple telle que celle choisie ici.

En particulier, la majorité des étudiants de ce niveau connaît et a déjà utilisé le critère dit « relation fondamentale de la dynamique » qui vient de la deuxième loi de Newton. Ce critère qui est souvent présenté sous la forme graphique du *Principe de D'Alembert* pour la partie « translation » associée à l'étude des systèmes ponctuels, comporte un volet « rotation » qui dans notre cas est nécessaire pour décider de l'état du système. En effet, la somme des forces extérieures, poids des masses additionnelles, de chaque moitié du fléau ainsi que la réaction du pivot, doit être nulle en même temps que la somme des moments de ces mêmes forces pour que le système soit en équilibre. Le système étant

pourvu d'un axe de rotation, il lui est impossible de se mouvoir suivant un mouvement de translation, ceci indique une somme des forces (vectorielle) nulle quelque soit la position et le mouvement de rotation du fléau, la vérification d'une somme des forces nulles n'est donc pas suffisante pour conclure quant à l'équilibre du système. De plus, la réaction du support du pivot sur le fléau passant par l'axe de rotation du système, son moment est toujours de valeur nulle et donc, seule la résultante des moments des poids des masses des deux demi-portions de fléau permet de conclure.

D'après les résultats de la deuxième partie, concernant les connaissances des étudiants sur ce sujet et les liens situations/conceptions, nous pouvons faire l'hypothèse que la situation proposée, étant proche des situations « prototypiques » servant à l'étude de ces concepts, appellera majoritairement l'utilisation de connaissances adéquates (en l'occurrence ici, un raisonnement à base de moments).

Analyse du système

Ce qui compte ici, c'est donc la valeur des moments du poids de chaque portion du fléau par rapport à l'axe de rotation. Examinons cela sur le schéma D.2 qui présente le système de type 1 dans une position d'équilibre horizontale particulière.

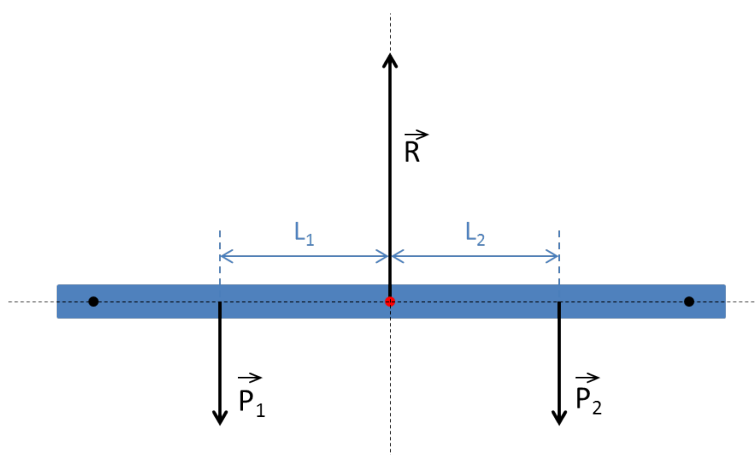


FIGURE D.2 – Schéma du dispositif proposé

La réaction du support de l'axe de rotation est noté \vec{R} , les poids de chaque demi-portion du fléau, \vec{P}_1 et \vec{P}_2 . Dans ce cas, on a :

$$\vec{P}_1 + \vec{P}_2 = -\vec{R} \quad (\text{D.1})$$

$$|\vec{P}_1|L_1 = |\vec{P}_2|L_2 \quad (\text{D.2})$$

avec $\vec{P}_1 = \vec{P}_2$ et $L_1 = L_2$ dans le cas de la figure D.2.

La première condition est toujours vraie quelque soit la position du fléau de cette pseudo-balance et indique l'impossibilité d'un mouvement de translation dû à l'axe de rotation. Tout se joue sur la deuxième condition et plus particulièrement sur la position du centre de masse du système par rapport au centre de rotation. Dans le cas présent des figures D.2 et D.3, ces deux centres sont confondus (représentés par un point rouge). En effet, la barre étant homogène, et les masses que l'on peut ajouter étant rondes, le centre de masse du système est toujours sur la ligne qui partage le fléau en deux moitiés égales dans le sens longitudinal.

Ceci implique que toutes les combinaisons de $|\vec{P}_1|$, $|\vec{P}_2|$ et L_1 , L_2 qui satisfont la deuxième égalité donneront lieu à des positions d'équilibre, quelle que soit l'inclinaison de la barre comme par exemple dans le cas de la figure D.3, c'est l'équilibre *indifférent*.

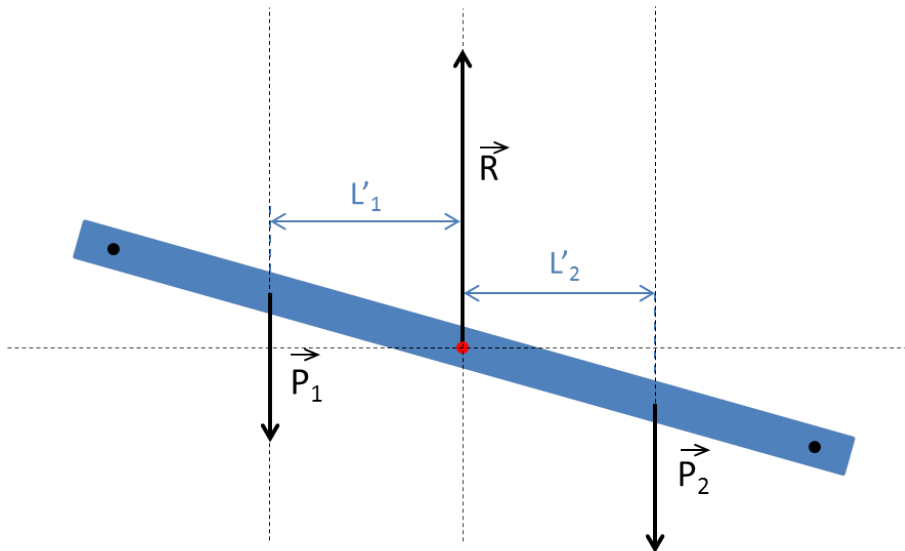


FIGURE D.3 – Une position d'équilibre indifférent, inclinée

Remarques

1. Ce cas pose beaucoup de difficultés aux étudiants et est donc très utilisé pour détecter des « défauts » de raisonnement des étudiants sur des systèmes mécaniques en équilibre comme dans (Newcomer & Steif, 2008) ou (Ortiz et al., 2005).
2. On peut penser que ce type d'équilibre, indifférent, était déjà connu d'Archimède (voir la partie historique de l'introduction générale pour plus de détails) et certains chercheurs comme le professeur de philosophie grecque Henry Mendell de la Californian State University (Los Angeles, États-Unis) ont même proposés que le terme grecque « isorropia » traditionnellement traduit par « équilibre » signifiait plutôt « incliné également », ce qui n'en fait pas un synonyme exact d'« horizontal » comme le laisserait penser son utilisation dans la « science des poids » médiévale et qui a justement conduit au terme même « équilibre » (ou « égalité de poids », voir l'étymologie de ce terme dans le chapitre 4.2).

Lorsque les deux centres (de masse et de rotation) ne sont pas confondus, l'équilibre n'est plus indifférent et l'on peut obtenir deux autres types d'équilibre, stable ou instable, et cela dépend de la position du centre de masse du système : s'il est au dessus ou en dessous de l'axe de rotation. Mais dans les deux cas, on conserve bien évidemment les égalités D.1 en cas d'équilibre.

L'équilibre dépend, en fait, de l'alignement vertical des deux centres.

Examinons la figure D.4, elle présente un cas où l'équilibre n'est pas assuré. Cela est dû au fait que les centres de masse (le point jaune) et de rotation (en rouge) ne sont pas verticalement⁹ alignés, les deux poids (associés à chaque distance point d'application-centre de rotation compté horizontalement) créent un moment résultant non nul par rapport à l'axe de rotation, en fait le produit de la distance d par le module de la somme des poids $|\vec{P}_1 + \vec{P}_2|$. Dans le cas proposé ici, il y a égalité des poids et des distances entre les points d'application de ces poids et l'axe de rotation, $L'_1 = L'_2$, alors que les distances entre les verticales des points d'application des poids et la verticale passant par l'axe de rotation ne le sont pas : $L''_1 > L''_2$. Et comme ce sont ces distances qu'il convient de prendre en compte pour le calcul des moments de ces forces par rapport à l'axe de rotation, il n'y a pas égalité des moments et donc pas d'équilibre. Dans ce

9. Il ne s'agit pas d'une condition absolue. Comme les forces en jeu ici sont des forces de pesanteur, elles sont orientées verticalement par rapport au sol et vers le bas. Dans l'absolu, ce qui compte, est que les vecteurs résultants et les points d'application de ceux-ci soient sur une même ligne.

cas-ci, comme le centre de masse est situé sous le centre de rotation, le moment résultant va faire tourner le système qui va se déplacer vers l'unique position d'équilibre stable, qui est horizontale. Replaçant, ainsi, le centre de masse à la verticale du centre de rotation.

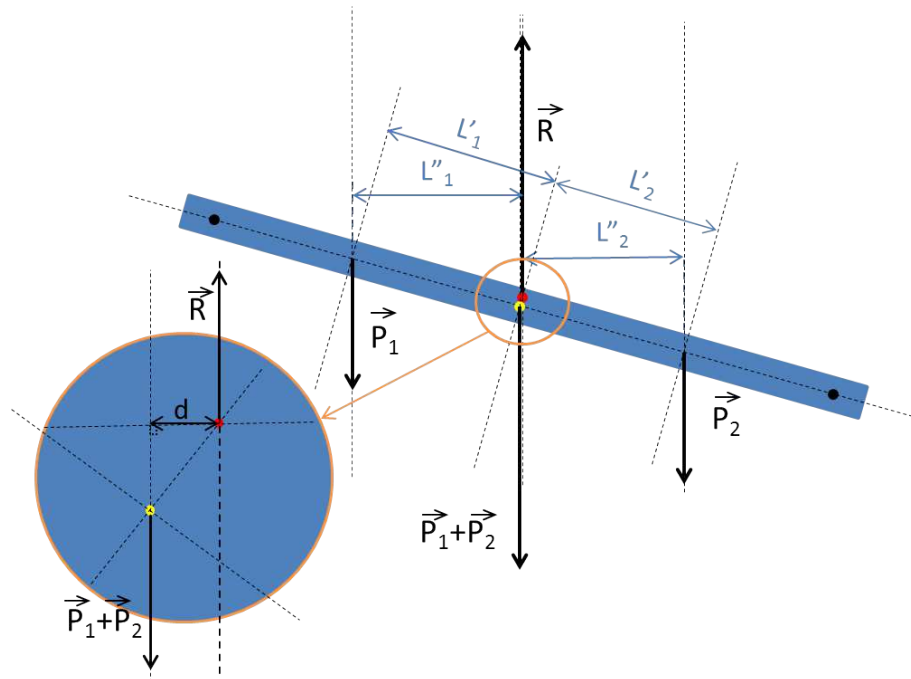


FIGURE D.4 – Une position de « non équilibre » incliné

Cependant, même dans cette configuration, il y a possibilité d'obtenir un équilibre avec une position inclinée du fléau et non coïncidence des centres de rotation et de masse comme sur la figure D.4 et, là encore ces cas d'équilibre sont peu identifiés par les élèves. C'est ce qui est présenté sur la figure D.5. Dans ce cas, les équations D.1 sont vérifiées parce que le module $|\vec{P}_1|$ est inférieur à celui de $|\vec{P}_2|$ du fait de la présence d'un lest, les distances L'_1 et L'_2 étant toujours égales, le centre de masse est maintenant situé plus près du point d'application de \vec{P}_2 que de celui de \vec{P}_1 ce qui le place en dessous du centre de rotation, à la verticale de celui-ci. Le moment résultant $|\vec{P}_1|L''_1 + |\vec{P}_2|L''_2$ est alors nul du fait que $L''_1 > L''_2$ dans des proportions adéquates.

Comme on peut le constater dans les analyses précédentes, la prévision de l'état d'équilibre de ce système ainsi que de la stabilité ne requière l'utilisation d'aucune connaissance « pointue » ou, du moins, hors de portée d'un étudiant de première année d'école d'ingénieur ou de troisième année d'université. On peut noter d'ailleurs, que Pia-



Les situations proposées aux étudiants seront toutes issues de ces différentes configurations mais avec l'axe de rotation en dessus ou au dessous du centre de masse, et la présence ou l'absence de lest d'un côté ou de l'autre.

Le scénario global de présentation des photos-situations (voir figure D.6) et l'identification des situations proposées pour cette partie du test est le suivant :

10. Le produit des déplacements par les valeurs des forces.

2. Une situation du système (instable) en position horizontale (équilibre) : S2
3. Une situation du système (stable) en position horizontale (équilibre) : S3
4. Une situation du système (indifférent) en position inclinée (équilibre) : S4
5. Une situation du système (instable) en position inclinée (pas en équilibre) : S5
6. Une situation du système (stable) en position inclinée (pas en équilibre) : S6
7. Une situation particulière dépendant du type du système (S7) :
 - Une situation du système lesté en position horizontale (pas en équilibre) pour le système 1
 - Une situation du système lesté en position inclinée (en équilibre) pour le système 2

8. Présentation des résultats

Les questions posées aux élèves dans cette partie suivent le schéma suivant pour chacune des situations des photos-situations D.6 :

- D'après vous lorsqu'on va lâcher la barre, que va-t-il se passer ?
 - Rien, la barre va rester dans la position où elle se trouve
 - Elle va pivoter
 - Je ne sais pas
- Dans le cas où vous pensez que rien ne vas se passer, diriez-vous que c'est un équilibre :
 - Stable
 - Instable
 - Indifférent
 - Je ne sais pas

Ces situations sont présentées dans l'ordre horizontal. Ensuite, on présente des situations avec une inclinaison, et pour ces situations D.7 et la situation 7 (non représentée), il y a une question supplémentaire dans le cas de la réponse « Elle va pivoter » :

➤ Dans le cas où vous pensez qu'elle va pivoter, dans quelle position va-t-elle s'arrêter ?

- À l'horizontal
- À la verticale
- Je ne sais pas



FIGURE D.6 – Situations initiales horizontales de la première partie



FIGURE D.7 – Situations initiales inclinées de la première partie

Après ces questions, on montre les solutions (c.-à-d. qui arrive lorsqu'on lâche la barre) sur une même planche de photos (ici, D.8, D.9, D.10 et D.11)

On demande aux étudiants, par le biais de cases à cocher sur la même page que les solutions, de préciser pour quelle(s) situation(s) l'évolution du système leur paraît la plus inattendue et un champs ouvert leur permet ensuite de répondre à la question « Selon

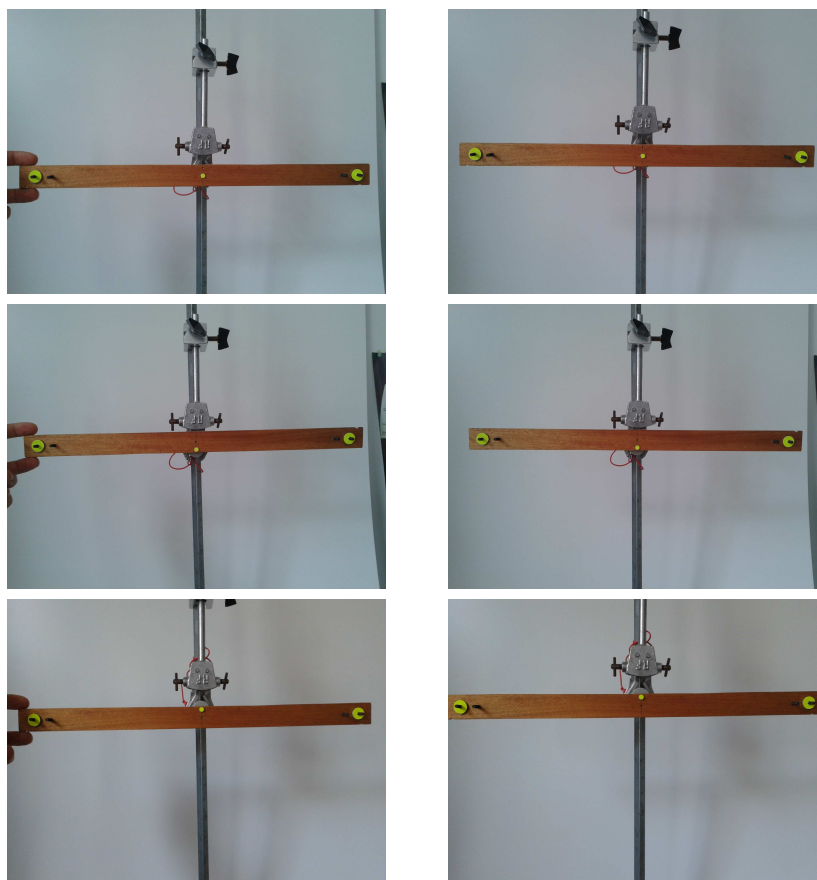


FIGURE D.8 – Situations initiales et finales pour le système 1 horizontal

vous, comment peut-on expliquer ces différents comportements, attendus ou non ? ». Toutes les réponses à ces questions sont obligatoires pour passer d'une page à l'autre du questionnaire et il n'y a pas possibilité de revenir en arrière.

A la fin de cette première partie de questions/réponses à choix multiples, le sondé connaît donc l'évolution du système à partir de chaque configuration de départ. Cependant, il n'est fourni aucune explication supplémentaire. Le participant, lui, est amené à en fournir une à partir de ce qu'il savait déjà et des éléments apportés par la présentation des « solutions ». Une des manières de répondre, par exemple, est d'analyser les changements *dans* le système pour chaque couple de photo initiale/finale afin de se rendre compte que la position de l'axe de rotation sur la largeur du bras va influencer sur le comportement du système.

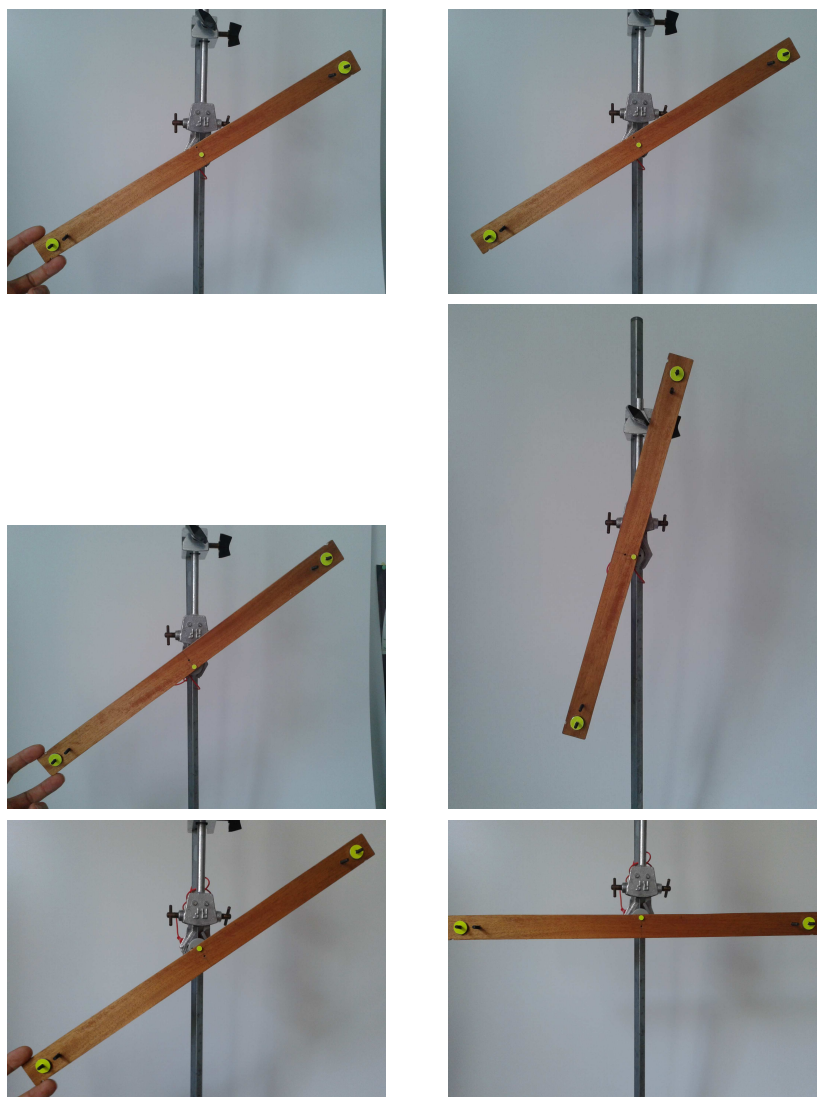


FIGURE D.9 – Situations initiales et finales pour le système 1 incliné

D.2.3 Partie *évolutionniste*

Description du test

Dans la seconde partie, les étudiants sont amenés à réfléchir sur les mêmes situations que pour la première partie mais ici, pour répondre correctement aux questions posées, ils n'ont à appliquer aucun critère disciplinaire mais plutôt à analyser l'évolution du système depuis une position initiale vers une position finale pour en déduire si ce système est dans une position initiale d'équilibre, ou non, et si celle-ci est stable, ou non, dans le cas affirmatif.

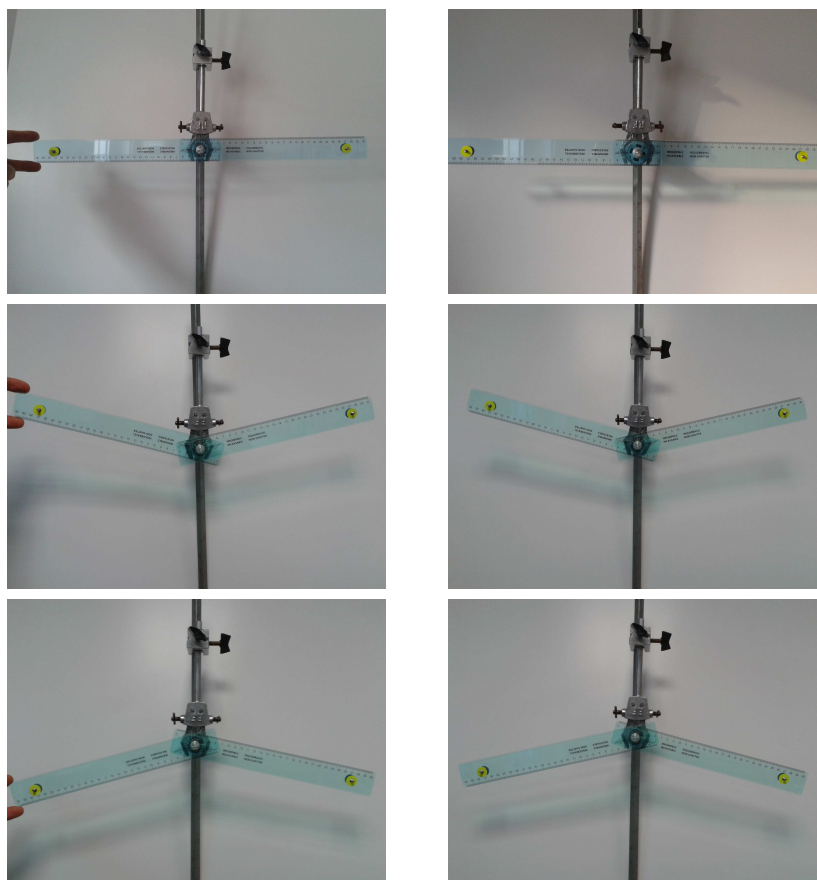


FIGURE D.10 – Situations initiales et finales pour le système 2 horizontal

En ce sens, comme il s'agit d'une observation de « ce qu'il s'est passé » et non d'une prédiction, il s'agit bien ici d'adopter une approche « évolutionniste ».

Structure du test

On présente aux sondés des planches de photos sur lesquelles on a ré-ordonné les systèmes précédant en opérant des regroupements par types (stables, instables et indifférents).

Le premier groupe proposé est celui du système en équilibre indifférent¹¹ (axe au centre géométrique de la barre pour le système droit et demi-bras biens alignés pour le système 2, par exemple celui de la figure D.12). Pour chaque groupe de photos, Il y a un groupe de trois questions :

11. Ceci n'est pas écrit dans le questionnaire.



FIGURE D.11 – Situations initiales et finales pour le système 2 horizontal

1. Pour ce système, vous diriez que la position horizontale est une position d'équilibre ?
 - Oui
 - Non
 - Je ne sais pas
2. Pour ce système, vous diriez que la position inclinée est une position d'équilibre ?
 - Oui

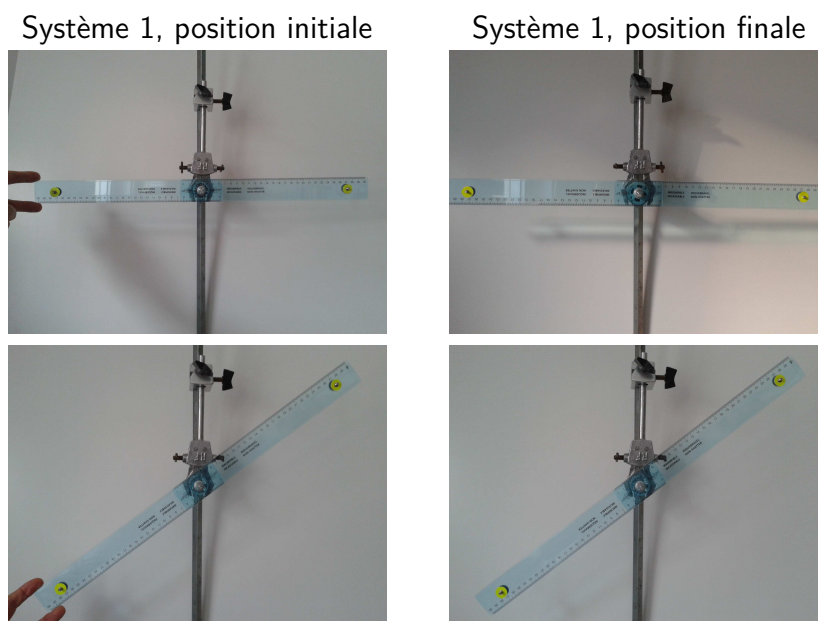


FIGURE D.12 – Situations initiales et finales pour le système 2 « indifférent »

- Non
 - Je ne sais pas
3. Pour ce système, vous diriez que la position verticale est une position d'équilibre ?
- Oui
 - Non
 - Je ne sais pas

D.3 Objectifs du test

D.3.1 Partie disciplinaire

Comme cela a été remarqué lors de l'étude des questionnaires relatif aux connaissances déclaratives/procédures/schématiques de la première partie, auprès d'un échantillon d'élèves ingénieurs, l'application du principe fondamental de la dynamique (ou relation fondamentale de la dynamique) se résume souvent à l'application par les élèves de la partie « translation » ou somme des forces de celui-ci. Dans le cas de la balance

présenté ici, une application partielle de ce type ne permet pas de conclure quant à l'équilibre du système. On attend donc des taux de réponse erronées relativement importants pour certains cas précis comme celui de la situation inclinée en équilibre indifférent (S4) et de la situation inclinée du système instable (S5).

Une utilisation sur un panel de 45 élèves d'une école d'ingénieur en fin de première année (niveau L3) nous a permis de vérifier cela : 38 % des étudiants pensent que dans la situation S2, la barre va pivoter, ce qui est en accord avec une conception qui rejetterai les situation d'équilibre instables (identification équilibre-stable). De même, la prévision de pivotement dans la situation S5 est très marquée (71 %), représentative des conceptions équilibre-horizontal venant de l'image de la balance et dans la situation S5, bien que la prévision d'un mouvement ai été trouvé pour 89 % des sondés, ils sont 60 % à penser qu'elle va retrouver une position horizontale (ici c'est le caractère instable du système qui n'a pas été prévu).

Ce test nous a montré que le type de système n'avait pas d'influence majeure sur les réponses des étudiants dans cette partie (moins d'un point de pourcentage d'écart dans les réponses aux questions les plus représentatives). Quant aux raisonnements utilisés pour répondre, nous les avons questionné en menant des entretiens individuels auprès de 9 étudiants d'université sur le principe du « think-aloud » (Ericsson & Simon, 1980). L'intervention consistait à veiller à ce que l'étudiant parle bien à voix haute durant tout l'entretien et aussi à susciter des questionnements d'approfondissement pour vérifier le degré de réflexion de l'élève (mais sans guider). Il s'avère en fait que les étudiants ne font pas appel, dans leur grande majorité, à un procédé systématique comme celui du bilan des efforts extérieurs mais préfèrent le plus souvent utiliser des considérations quantitatives quand aux « poids »¹² des deux portions de chaque côté du pivot. Certains invoquent par exemple que les deux côtés « ayant le même poids » vont « s'équilibrer relativement à leurs distance par rapport au sol » ou que la barre vas se mettre dans une position « entre horizontal et vertical puisqu'il y a plus de poids d'un côté que de l'autre »¹³ ou invoque des raisons de symétrie de configuration¹⁴ pour expliquer la stabilité ou encore que « l'axe de rotation n'est pas aligné avec les masses et que donc le système va commencer à tourner »¹⁵. La majorité des étudiant déclare cependant connaître un critère

12. sans que l'on sache toujours s'il s'agit bien du poids ou de la masse dont il est question tant les deux termes sont utilisés de façon interchangeable dans le discours des étudiants.

13. Andres Felipe, situation inclinée 4, système 2

14. Bryan Mauricio, situation 5, système 2

15. Erwin German, situation horizontale 2, système 1

systématique pour vérifier l'équilibre et presque exclusivement celui de la somme des forces (et parfois des moments).

Cette première partie remplit deux objectifs. D'une part, un objectif de *catégorisation* : elle permet de collecter des données quant à la fréquence de certaines conceptions erronées identifiées dans les situations « prototypiques » proposées, chez les étudiants interrogés. D'autre part, elle permet de susciter un lien entre des cas de conflit prévision/évolution et un paramètre variable de la situation que l'on peut vérifier en examinant les photos avant/après (en l'occurrence, la position de l'axe de rotation sur la largeur de la barre). Cette fonctionnalité du questionnaire est utilisable à des fins de formation : on suscite en effet la réflexion de celui qui passe le test dans la partie « prévision » et on propose ensuite une piste (certes implicite dans la présentation des résultats) permettant d'avancer, seul ou guidé, dans la recherche d'une explication quant à l'évolution du système. Cette possibilité a été testée en particulier dans les entretiens de type « Talk Aloud » décrit au paragraphe précédent (mais qu'il conviendrait d'évaluer de manière systématique, ce qui n'a pas été fait).

D.3.2 Partie « évolutionniste »

Cette partie du test est directement étudiée pour questionner l'existence d'un raisonnement de type « évolutionniste » chez les étudiants : lorsque l'on dispose des états d'un système en des instants t et $t+T$ quelconques et que l'on connaît les perturbations et entrées appliquées (on est ici cependant en présence d'un système libre) au système pendant ce temps, on est en mesure de dire si l'état initial est un état d'équilibre ou non, et s'il est stable ou non.

Comme pour la première partie, cette partie a fait l'objet d'un « Talk Aloud » avec une dizaine d'étudiant d'une université colombienne afin de vérifier quels étaient les types de raisonnement mis en œuvre, après un enseignement comprenant l'ingénierie didactique présentée dans la troisième partie. Le guidage apporté par la présentation des situations « avant-après » incite bien les étudiants à raisonner de cette façon, comme on l'observe dans l'exemple suivant : L'étudiant lit l'énoncé et décrit complètement les photos puis lit la première question (« Pour ce système, vous diriez que la position horizontale est une position d'équilibre ? ») avant de répondre :

Je dirais que oui, parce que quand on lâche la barre [...] elle conserve ses propriétés. - OK, donc ton critère pour dire que c'est une position d'équilibre

est que? - *Qu'elle conserve ses propriétés [...] en parlant de sa position ...pareil que pour le second système - c'est-à-dire? - c'est-à-dire que pour une position inclinée je dirait que oui c'est une position d'équilibre parce qu'elle se conserve [...].* (ANDRES FELIPE (12 :57))

Pour la deuxième question, l'étudiant fournit le même type d'explication faisant état d'un raisonnement approprié dans ces cas là et correspondant au raisonnement « évolutionniste » recherché.

Pour la troisième question qui ne fait pas appel à une photo (on demande d'imaginer ce qui se passerait pour la position verticale de la barre), on obtient une justification tout-à-fait cohérente à ce niveau¹⁶ : « *Cela dépend...si la position initiale est verticale, oui, la position verticale serait une position d'équilibre si la position final est verticale [...]* » (ANDRES FELIPE (14 :04)) On peut remarquer de plus qu'ici l'étudiant ne fait pas appel à la position de l'axe de rotation, élément qu'il aurait pu utiliser mais la présentation des situations « avant/après » le conduit à adopter ce raisonnement. Voici un second exemple : l'étudiant lit la question et répond ensuite à voix haute :

Je dirais que oui parce que il n'y a aucun changement que représente la perturbation qui est sur la première image. - OK - (passage à la seconde question) Donc pour ce système, diriez-vous que la position inclinée est une position d'équilibre? Alors, je dirais aussi que oui pour la même raison, parce qu'il ne se présente aucun changement par conséquent il n'y a aucune perturbation y ... (passage à la troisième question) - Ici, nous n'avons pas la photo de la position verticale, il s'agit plus d'une prévision. - Alors, malgré qu'elle ne soit pas visible, je dirais que oui, ça pourrait être aussi une position d'équilibre, étant donné que, comme ce qu'on a vu avant aucun changement ne va se présenter. (BRAYAN MAURICIO (18 :55))

On observe ici aussi le raisonnement attendu qui permet de conclure correctement dans tous les cas présentés alors que, le même étudiant avait prédit que la barre allait tourner dans le cas « indifférent » incliné de la première partie (réponse erronée dans ce cas).

L'objectif principal de cette partie du test est de permettre une évaluation de type pré-post-test : les réponses attendues dans cette partie (au contraire de la première) n'étant pas données, il est envisageable de l'utiliser deux fois avec les mêmes étudiants sans craindre un effet d'apprentissage (qui peut être et sera vérifié de manière statistique)

16. En fait on pourrait conclure de manière plus directe puisque les deux autres positions étant des positions d'équilibre le système est clairement « indifférent » et donc toutes positions sont alors des positions d'équilibre. Ce raisonnement implique cependant des connaissances plus fines sur le comportement des systèmes.

afin d'évaluer l'apport d'une action didactique ciblé sur ce raisonnement.

D.4 Développement de l'outil

Cet outil a été décliné en trois langues différentes afin de s'adapter à nos publics cibles dans les deux environnements « de base » de cette étude : les élèves ingénieurs français et colombiens ; et permettre son utilisation à plus grande échelle dans le monde anglophone par le biais de « personnes relais ».

Le questionnaire fut créé au départ en utilisant l'outil de création de sondage en ligne JotForm (<http://french.jotform.com/>). Pour des raisons de facilité d'administration du questionnaire et de développement nous avons conçu notre propre outil sur cette base - écrit dans le langage PHP - et intégré celui-ci à un site personnel pour finalement le lier à une base de donnée de type SQL, le tout située sur un serveur de l'École des Mines de Nantes. Ceci nous permet d'être indépendant de l'éditeur en ligne proposé par JotForm-Interlogy.

Parmi les quelques fonctionnalités ajoutée à l'application de base, figurent :

- Le choix pseudo-aléatoire¹⁷ de la variante du questionnaire (fléau mono-bloque ou en deux parties)
- L'affichage de statistiques de base, de manière graphique, pour suivre l'évolution des réponses « en temps réel »
- L'envoi d'un courrier électronique à chaque essai, qui permet de vérifier le nombre de questionnaires envoyés en temps réel sans accéder à la base de données (et de conserver un historique des questionnaires en cas de problème avec celle-ci)

Sa mise en œuvre ne nécessite que l'utilisation d'un ordinateur relié au réseau Internet et un logiciel de navigation.

17. Qui fournit un ratio de 50% des deux types de questionnaires.

D.5 Conclusion

Nous avons développé un outil de test répondant à deux objectifs principaux : 1) recueillir des données quant à la fréquence de certaines des conceptions identifiées chez les étudiants et 2) mesurer le caractère opérationnel de notre approche « évolutionniste » de l'équilibre et de la stabilité sur un système simple par exemple dans le cadre de tests de type avant/après (pré-post-tests).

Bien que l'utilisation principale visée est l'évaluation de séquences de classe relatives à ces concepts, cet outil a aussi des possibilités de formation, de par l'agencement des situations présentées et les liens qu'il permet de faire entre certaines caractéristiques du système et son comportement (en étant guidé par quelqu'un). Il a d'ailleurs déjà été utilisé dans ce but, lors d'un atelier sur l'équilibre et la stabilité mené auprès d'une quinzaine d'enseignants d'école primaire et secondaire en Colombie. Ceci a permis d'en vérifier, entre autre, sa polyvalence et son caractère « simple » de mise en œuvre et d'appropriation.

Table des matières

1	Introduction générale	1
1.1	Contexte et problématique	1
1.2	Analyse de contenu : qu'est-ce que l'équilibre ?	3
1.2.1	Éléments historiques	4
1.2.2	Système et « approche systémique »	15
1.2.3	Équilibre et stabilité : quelques définitions	17
1.2.4	Équilibre ou <i>régime permanent</i> ?	18
1.3	Le plan de cette étude	20
I	Les étudiants face aux concepts d'équilibre et de stabilité	23
	Introduction	25
2	Les difficultés des élèves ingénieurs à propos des concepts d'équilibre et de stabilité	27
2.1	Introduction	27
2.2	État de l'art	27
2.3	La collecte des données	30
2.3.1	Le cadre des « facets of thinking »	30
2.3.2	L'instrument d'évaluation : questionnaire à choix multiple	32
2.3.3	Structure des questionnaires	35
2.3.4	Analyse des données	38
2.4	Résultats	40
2.4.1	Partie 1	41
2.4.2	Partie 2	42
2.5	Conclusion	46

3	Les connaissances des étudiants ingénieurs à propos de l'équilibre et de la stabilité	49
3.1	Introduction	49
3.2	Présentation du questionnaire	53
3.2.1	Partie « schématique » (Q1)	53
3.2.2	Partie « procédurale » (Q2)	56
3.2.3	Partie « déclarative » (Q3)	58
3.2.4	Présentation des résultats	58
3.2.5	Analyse	64
3.3	Conclusion	65
4	Exploration des origines possibles des difficultés des étudiants à propos du concept d'équilibre	67
4.1	Introduction	67
4.2	Langage « courant » et expérience quotidienne	70
4.2.1	Analyse lexicographique	70
4.2.2	Influences du langage et des expériences quotidiennes	73
4.3	Le contexte scolaire	76
4.3.1	Introduction	76
4.3.2	L'équilibre et la stabilité dans les programmes français	76
4.3.3	L'équilibre et la stabilité dans les programmes colombiens	78
4.4	Conclusion	79
	Conclusion	81
II	Étude d'une ingénierie didactique adaptée	83
5	Introduction : l'approche « évolutionniste »	85
5.1	Introduction	85
5.2	Une nouvelle approche ?	86
5.3	Implications	87
5.4	Conclusion	89
6	Le cadre de l'ingénierie didactique	91
6.1	Introduction	91

TABLE DES MATIÈRES

6.2	Un cadre méthodologique	91
6.3	Deux exemples	93
6.3.1	Introduction	93
6.3.2	L'apprentissage du théorème de Thalès	94
6.3.3	La conservation du mouvement	97
6.4	Conclusion	100
7	Étude d'une ingénierie didactique « équilibre et stabilité »	103
7.1	Introduction	103
7.1.1	Les modèles expérimentaux	104
7.2	Analyses préliminaires	104
7.2.1	Analyse de contenu	104
7.2.2	L'enseignement usuel et ses effets	106
7.2.3	Les cadres de référence liés au <i>changement conceptuel</i>	106
7.2.4	Analyse des conceptions	110
7.2.5	Champ des contraintes	116
7.3	Analyse <i>a priori</i>	118
7.3.1	La séquence	120
7.3.2	Les variables didactiques	121
7.3.3	Les situations	121
7.3.4	Description de la séquence	123
7.4	Première expérimentation	131
7.4.1	Introduction	131
7.4.2	Matériel produit	131
7.4.3	Organisation pratique	131
7.4.4	« Historisation » des séances	132
7.5	Analyse <i>a posteriori</i>	132
7.5.1	Introduction	132
7.5.2	Équilibre, première phase, premier questionnaire individuel	133
7.5.3	Équilibre, deuxième phase, première activité de groupe	134
7.5.4	Équilibre, troisième phase, second questionnaire individuel	137
7.5.5	Équilibre, quatrième phase, seconde activité de groupe	139
7.5.6	Stabilité, première phase, premier questionnaire individuel	142
7.5.7	Stabilité, deuxième phase, première activité de groupe	144

TABLE DES MATIÈRES

7.5.8	Stabilité, troisième phase, second questionnaire individuel	147
7.5.9	Stabilité, quatrième phase, seconde activité de groupe	148
7.5.10	Conclusion	149
7.6	Seconde expérimentation	150
7.7	Évaluation externe et entretiens d'explicitation	150
7.7.1	À propos des schémas expérimentaux	150
7.7.2	Construction d'un indicateur	153
7.7.3	Première session, deuxième semestre 2013	154
7.7.4	Entretiens d'explicitations	156
7.7.5	Deuxième session, premier semestre 2014	156
7.8	Conclusion	158
Conclusion		161
III Conclusions et perspectives		163
8 Conclusions		165
9 En quoi le manque de compréhension des concepts d'équilibre et de stabilité est-il problématique chez les élèves ingénieurs ?		169
9.1	Introduction	169
9.2	La question de « l'influence de l'entrée »	170
9.2.1	En école d'ingénieur	170
9.2.2	En faculté d'ingénierie	172
9.2.3	Discussion des résultats	173
9.3	Conclusion	174
10 Perspectives		175
Références		177
Annexes		187
Liste des annexes		191

Lexicographie	191
A.1 Lexicographie du mot <i>équilibre</i>	191
A.1.1 Définitions historiques	197
A.1.2 Définition espagnole	198
A.2 Lexicographie du mot <i>stabilité</i>	198
A.2.1 Définition espagnole	204
Les questionnaires	207
B.1 Les questionnaires « Ingénierie Didactique »	207
B.2 Les questionnaires « connaissances »	221
Équations du système pendule/chariot	225
Un outil d'évaluation informatique du raisonnement « évolutionniste »	229
D.1 Introduction	229
D.2 Structure globale du test	230
D.2.1 Les dispositifs proposés	230
D.2.2 Partie disciplinaire	232
D.2.3 Partie <i>évolutionniste</i>	242
D.3 Objectifs du test	245
D.3.1 Partie disciplinaire	245
D.3.2 Partie « évolutionniste »	247
D.4 Développement de l'outil	249
D.5 Conclusion	250